



VYUŽITÍ NÁSTROJŮ CFD PŘI OPTIMALIZACI CÍRKULACE VODY V PLAVECKÝCH BAZÉNECH

USE OF CFD FOR OPTIMALIZATION OF WATER CIRCULATION IN SWIMMING
POOLS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2019

AUTOR PRÁCE:

Roman ADAIGUZHIEV

VEDOUCÍ PRÁCE:

Ing. Petr SKLENÁŘ, Ph.D.



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Adaiguzhiyev Jméno: Roman Osobní číslo: 438122
Zadávající katedra: Katedra hydrauliky a hydrologie
Studijní program: Stavební inženýrství -B3651
Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby (3647R015)

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Využití nástrojů CFD při optimalizaci cirkulace vody v plaveckých bazénech

Název bakalářské práce anglicky: Use of CFD for optimalization of water circulation in swimming pools

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se problematikou proudění v plaveckých bazénech při zajištění optimálních hydraulických podmínek cirkulace vody. Provéřte možnosti využití simulačních modelů CFD pro hydraulické posouzení proudění v bazénové části. Pokuste se o optimalizaci návrhu dispozičního uspořádání vtokových a odtokových míst v bazénu, případně o zobecnění získaných poznatků s ohledem na zajištění efektivní cirkulace obsahu bazénu při splnění hygienických, bezpečnostních a ekonomických požadavků provozu.

Seznam doporučené literatury:

- např. ČSN EN 13451-3 +A3 (940915). Vybavení plaveckých bazénů - Část 3. Další specifické bezpečnostní požadavky a zkušební metody pro vtoky a odtoky vody a vodní atrakce
- ostatní související normy
- ANSYS FLUENT Tutorial Guide
- Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX. M. Kozubková (2008)

Jméno vedoucího bakalářské práce:

Ing. Petr Sklenář, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 22.2.2019

Termín odevzdání bakalářské práce: 26.5.2019

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

28.2.2019

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)



**FAKULTA
STAVEBNÍ
ČVUT V PRAZE**

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma “ *Využití nástrojů CFD při optimalizaci cirkulace vody v plaveckých bazénech*” vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Petra Sklenáře, Ph.D. s použitím materiálů uvedených v seznamu literatury a s pomocí Ing. Tomáše Kašpara.

V Praze dne: 26.05.2019

.....
Roman Adaiguzhiyev



**FAKULTA
STAVEBNÍ
ČVUT V PRAZE**

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Sklenářovi, Ph.D. a panu Ing. Kašparovi za podnětné rady, věcné připomínky, poskytnutou literaturu, ochotu a trpělivost při psaní této práce.

V Praze dne: 26.05.2019

.....
Roman Adaiguzhiyev



Název práce: Využití CFD při optimalizaci cirkulace vody v plaveckých bazénech

Autor: Roman Adaiguzhiyev

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

Katedra: Katedra hydrauliky a hydrologie

Vedoucí práce: Ing. Petr Sklenář, Ph.D.

E-mailová adresa: Petr.Sklenar@cvut.cz

ČLENĚNÍ PRÁCE

Práce je členěna do 10 hlavních kapitol. Nejdříve je vytyčen hlavní cíl práce, k němuž práce směřuje. Úvodní kapitola shrnuje podstatná fakta a skutečnosti v oblasti hydrauliky bazénů a zmiňuje motivaci pro studium s využitím nástrojů výpočetní dynamiky tekutin (Computational Fluid Dynamics – zkráceně CFD). Po stručném úvodu následuje popis použitých nástrojů a metod řešení a způsoby aplikace. V aplikační části je uveden soupis základních variant modelovaných situací ve vztahu k hydraulice plavecké části bazénu. Navazující části práce ukazují konkrétní aplikaci nástrojů CFD pro jednotlivé dispozice bazénu, proces získání potřebných informací a naznačení způsobů posouzení dílčích výsledků. Závěrem této práce je provedeno celkové shrnutí výsledků, posouzení, zda některá z variant vykazuje výrazně lepší možnosti pro optimalizaci hydraulických podmínek proudění v prostoru bazénu a nakolik je metoda vizualizace proudu pomocí CFD využitelná při návrhu plavecké části bazénu.

OBSAH

OBSAH	7
1 STANOVENÍ CÍLŮ PRÁCE	9
2 ÚVOD	10
3 HYDRAULICKÉ A HYGIENICKÉ PODMÍNKY VE VEŘEJNÝCH BAZÉNECH.....	11
4 MRTVÉ ZONY	12
4.1 Charakteristika oblasti.....	12
4.2 Metoda hledání mrtvých zón	13
4.2.1. Hledání mrtvých zón pomocí kritéria maxima difference rychlostí v rovině hlavního proudu.....	15
5 ZÁKLADY MATEMATICKÉHO MODELOVÁNÍ PRO ÚČELY CFD ANALÝZY.....	16
5.1 Pojem CFD	16
5.2 Základní principy.....	16
5.3 Postup řešení.....	17
5.4 Stručný popis některých používaných metod	17
5.5 Model turbulence	18
6 PŘÍPRAVA K MODELOVÁNÍ	20
6.1 Geometrie	20
6.1.1 Parametry bazénu, vpusti, výpusti	20
6.1.2 Varianty rozmístění vtoků a výtoků.....	22
6.2 Výpočetní síť.....	26
6.2.1 Obecné informace	26
6.2.2 Kvalita výpočetní sítě.....	27
6.2.3 Aplikace	28
6.3 Okrajové podmínky	29
6.4 Parametry modelu.....	29
7 SIMULACE	32
7.1 Nastavení přesnosti řešení pomocí reziduí	32
7.2 Spouštění a průběh výpočtů	32
7.3 Ověření výsledků	34
8 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ (POSTPROCESSING).....	35
8.1 Aplikace nástroje Streamline	35
8.2 Rozbor vírových oblastí	37
8.3 Ukazatel maxima rychlostních rozdílů	38
8.4 Varianty s rozdělením průtokem a ostatní varianty.....	40

8.4.1 Var.1 ClassicM	41
8.4.2 Var.2 Turned	44
8.4.3 Var.2 TurnedM	46
8.4.4 Var.3 Combined	49
9 POSUDEK.....	52
10 ZÁVĚR.....	53
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	54

1 STANOVENÍ CÍLŮ PRÁCE

Předložená bakalářská práce se zaměřuje především na dosažení podmínek rovnoměrné výměny vody pro zvolený příklad plaveckého bazénu cestou optimalizace počtu a rozmístění míst vtoku a odběru z bazénu.

Problém pro plynulou a rovnoměrnou výměnu vody v bazénech představuje především vznik cirkulačních zón při proudění v bazénu, v nichž dochází k podstatně delšímu zadržení vody než v ostatních částech bazénu. To znamená, že ze 100 % nově přitékající vody určitá její část odtéká nejkratší cestou spolu s částí „staré“ vody a zbytek zůstane v bazénu s tou částí „staré“ vody, která je znovu recirkulována. Tyto nevyměněné zbytky vody zaujímají prostor tzv. mrtvých zón. Přítomnost mrtvých zón v bazénu, zejména z hlediska výrazně delší doby zdržení vody, překračující doporučenou průměrnou dobu výměny vody v bazénech, může negativně ovlivnit režim biologické kvality vody.

2 ÚVOD

Proudění vody v bazénu a úprava vody patří k základním podmínkám pro udržení čisté vody v bazénu. Zároveň se tak brání rozvoji nežádoucích organismů ve vodě a na vnitřním povrchu bazénu, které mohou vytvořit slizký povrch a způsobit zakalení vody. Dobře navržená hydraulika plavecké části bazénu zajišťuje optimální rozdělení desinfekčních činidel a přiváděné filtrované vody v celém objemu bazénu. Riziko zhoršení kvality vody, rozvoje řas a mikroorganismů volně rozptýlených v bazénové vodě i ulpělých na povrchu dna a stěnách bazénu se tím více snižuje, čím se v objemu bazénu nachází méně mrtvých zón. Při stagnaci proudění vody v určité části objemu bazénu dojde i k výraznému zhoršení hygienického zabezpečení vody omezeným přísunem desinfekčních činidel. Čím delší dobu zůstává voda bez výměny v klidu, tím snadněji se mohou mikroorganismy udržovat volně ve vzhledu nebo ulpívat na povrchu bazénu. Tím mohutnější bude i jejich rozvoj a nesnadněji se budou odstraňovat z bazénu a následně mohou představovat závažné hygienické a zdravotní riziko pro uživatele bazénu.

K řešení této problematiky lze přistoupit v několika způsoby 1) Tvarová optimalizace vlastního bazénu; 2) modelování speciálních vtokových a výtokových trysek umožňujících dosažení rovnoměrnějších hydraulických podmínek v jejich blízkosti; 3) eliminace co největšího množství mrtvých zón pomocí změny polohy a počtu míst vtoku a odtoku vody; 4) na základě sledování dráhy proudnic zvýšení intenzity vtoku do bazénu v místech, kde dochází ke stagnaci proudění, a snížení intenzity vtoku v místech, kde dochází ke vzniku zkratových proudů.

Pro modelování proudění vody v bazénu bude použit simulační nástroj CFD (Computational Fluid Dynamics) v prostředí programu ANSYS FLUENT.

3 HYDRAULICKÉ A HYGIENICKÉ PODMÍNKY VE VEŘEJNÝCH BAZÉNECH

Při řešení jakékoliv problematiky související s objektem určenému k veřejnému provozování musíme sledovat příslušné národní (nadnárodní) zákony a směrnice. U veřejných plaveckých bazénů, kde se jedná v souvislosti s provozováním o otázku zdravotních rizik v důsledku hygienických závad, jde zejména o související legislativu v oblasti působnosti rezortu zdravotnictví.

„Návrh veřejného bazénu musí být proveden v souladu s platnou vyhláškou MZ číslo 464/2000 Sb. a s ostatními navazujícími předpisy.“ [1]

Dále jsou uvedeny odstavce z této vyhlášky týkající se přísunu a výměny vody v bazénech:

„Zdroj vody pro bazén musí svou kvalitou trvale zaručovat, že zvolenou technologií bude za obvyklých podmínek provozu voda upravitelná na stanovenou kvalitu. Při volbě vodního zdroje se dává přednost zásobování vodou z veřejného vodovodu. Není-li to možné, lze bazén zásobovat ze zdrojů podzemních vod, které mají jakost odpovídající vodě pitné. V případě, že je bazén zásobován vodou povrchovou, musí tato voda svou jakostí odpovídat požadavkům stanoveným v příloze č. 2 nebo splňovat požadavky stanovené zvláštním právním předpisem pro vodárenské toky.“ [2]

„Způsob přítoku a odtoku vody musí zajišťovat, aby v bazénu docházelo k důkladnému směšování vody přiváděné do bazénu z úpravny vody s vodou v bazénu. Splnění tohoto požadavku se zabezpečuje dostatečným počtem vtokových a odtokových otvorů vhodně rozmístěných tak, aby při proudění vody nevznikaly v bazénu zkratové proudy a místa s pomalou výměnou vody, aby výměna vody probíhala na krátké dráze a v celém objemu bazénu. Odtok vody z bazénu se realizuje tak, aby umožňoval vtok vody na úpravnu jak z úrovně hladiny, tak i ze dna bazénu, případně v kombinaci obou odtoků.“ [3]

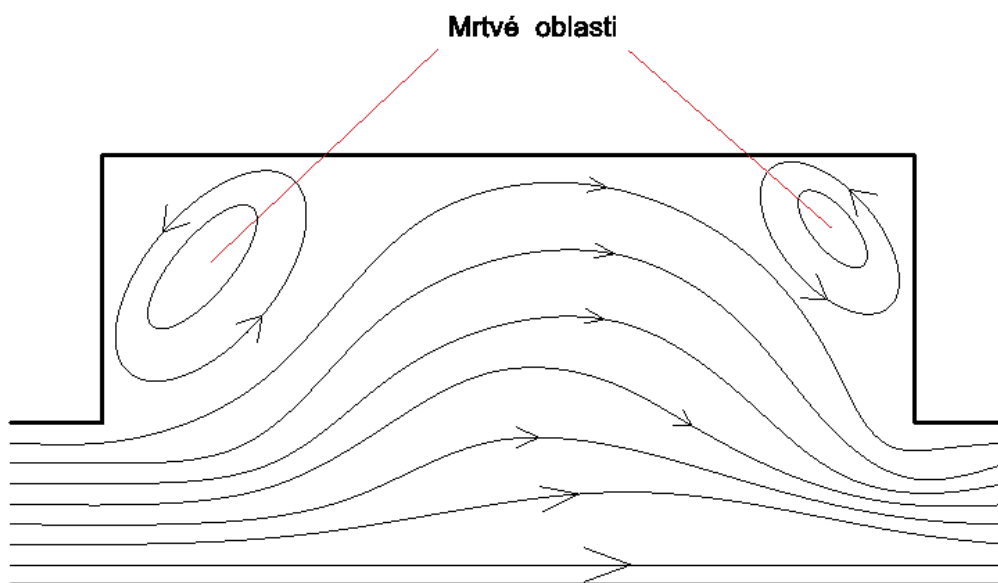
Z tohoto odstavce můžeme zdůraznit některé faktory potřebné pro určení směru řešení problematiky:

- a) Důkladné směšování vody – je nutné se vyhnout zónám, které se nezúčastní rovnoměrné výměny vody (tzv. mrtvé zóny).
- b) Počet a rozmístění míst přítoku a odtoku – správná volba polohy a počtu vtoků a výtoků je jedním ze zásadních faktorů ovlivňujících režim výměny vody v bazénovém prostoru.
- c) Pozorování a odhalení zkratových proudů – při vtoku vody do velké nádrže a následujícím odtoku dochází k jejímu proudění cestou nejmenšího odporu. Pokud se však zároveň jedná o nejkratší možnou cestu, znamená to, že nově vtékající voda odtéká dříve než ta, která byla do bazénu přivedena již dříve. Dochází ke vzniku preferenčních „zkratových cest“ proudění v bazénu a na druhé straně určitá část objemu vody setrvává déle ve stagnantních „mrtvých“ zónách, což může vést ke vzniku hygienických závad v bazénu.

4 MRTVÉ ZONY

4.1 Charakteristika oblasti

Za mrtvou zónu můžeme považovat takovou oblast v prostoru náplně bazénu s cirkulačně uzavřeným tokem, v němž dochází k zdržení objemu vody bez možnosti její výměny s okolním prostředím prostřednictvím proudění.



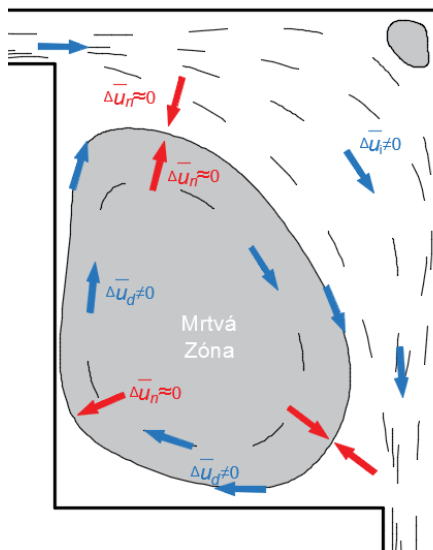
Obr. 4.1: Znázornění charakteru proudnic při vzniku mrtvých zón

Zcela se zbavit těchto oblastí, vzhledem k omezenému počtu míst vtoku a odtoku, bude prakticky nemožné. Proto se ve své práci zaměřím jen na omezení jejich množství a objemu, který zaujímají, na pozorování trajektorie proudů v jednotlivých místech bazénu a na stanovení nebo případně grafické vyjádření vlivu měněných parametrů rozmístění, počtu a intenzity vtokových a odtokových míst na výsledný charakter proudění v bazénu.

Jak již bylo zmíněno v úvodu, pro hledání mrtvých zón bude použit program ANSYS FLUENT, do něhož je třeba zadat odpovídající podmínky na hranici simulované oblasti.

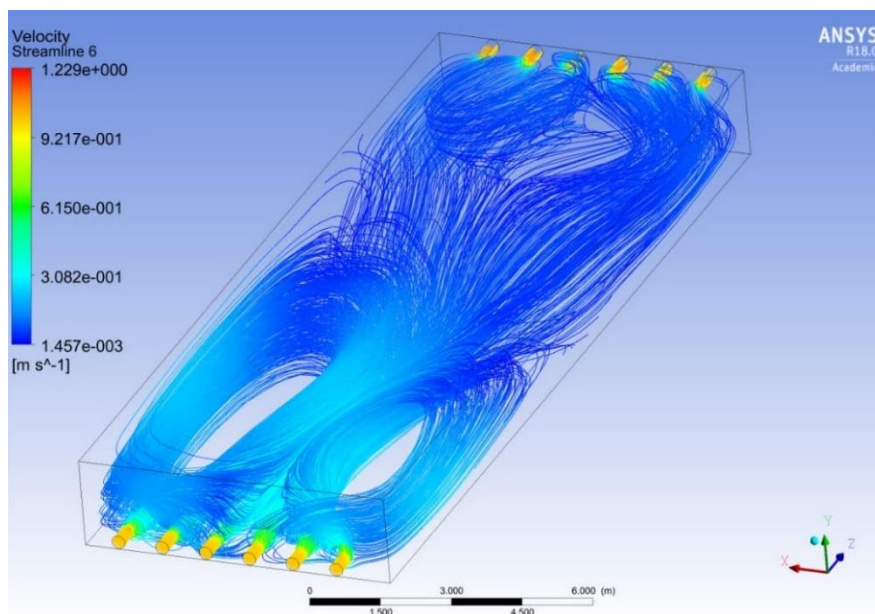
4.2 Metoda hledání mrtvých zón

Mrtvá zóna je oblast vymezená uzavřenými trajektorií rychlostního pole při proudění v bazénu, kde nedochází k přenosu hmoty s okolím permanentním ustáleným tokem. Trajektorie na rozhraní oblasti tvoří obálku. Tyto obálky můžeme stanovit na základě simulace proudění pomocí nástrojů CFD programu ANSYS FLUENT.



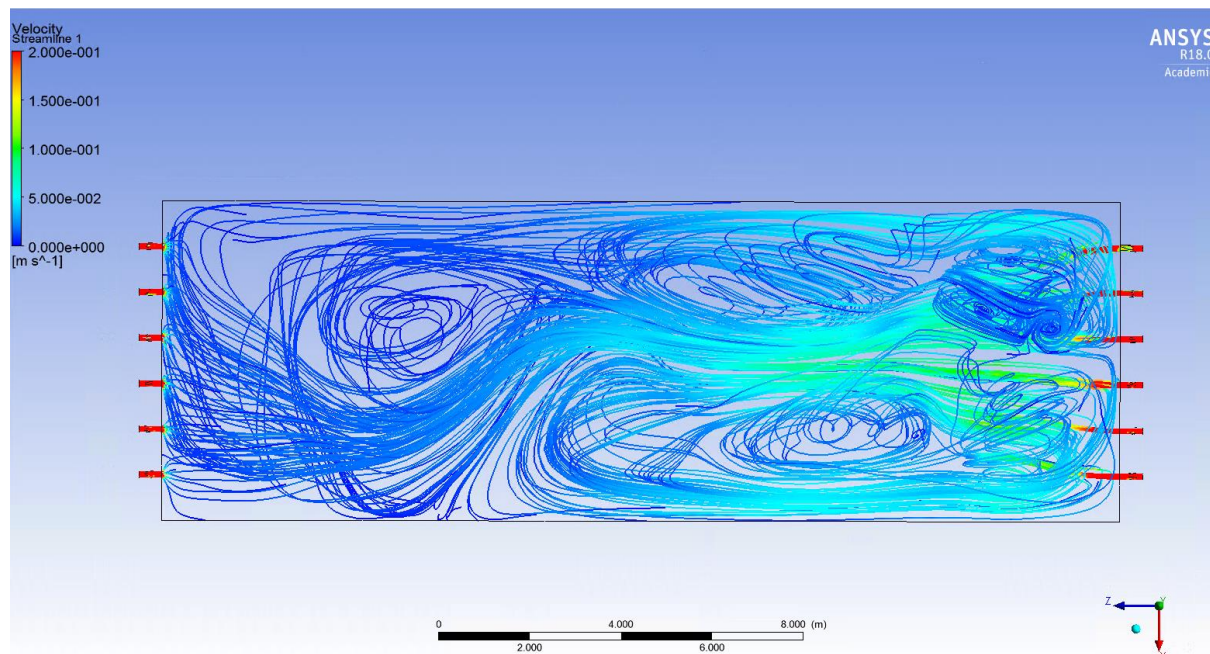
Obr. 4.2: Znázornění obálky mrtvé zóny a charakter vektorů rychlosti

Po nastavení geometrie bazénu, umístění vtokových/výtokových míst, vygenerování vhodné výpočetní sítě oblasti bazénu a po nastavení důležitých parametrů fyzikálních vlastností tekutiny a definování příslušných okrajových podmínek na jednotlivých částech hranice výpočetní oblasti lze simulací získat konkrétní představu o prostorové struktuře proudění v bazénu, která může být v grafické podobě zobrazena pomocí trajektorií rychlostního proudového pole – streamlines. Přesnější popis je uveden v kapitole 8.

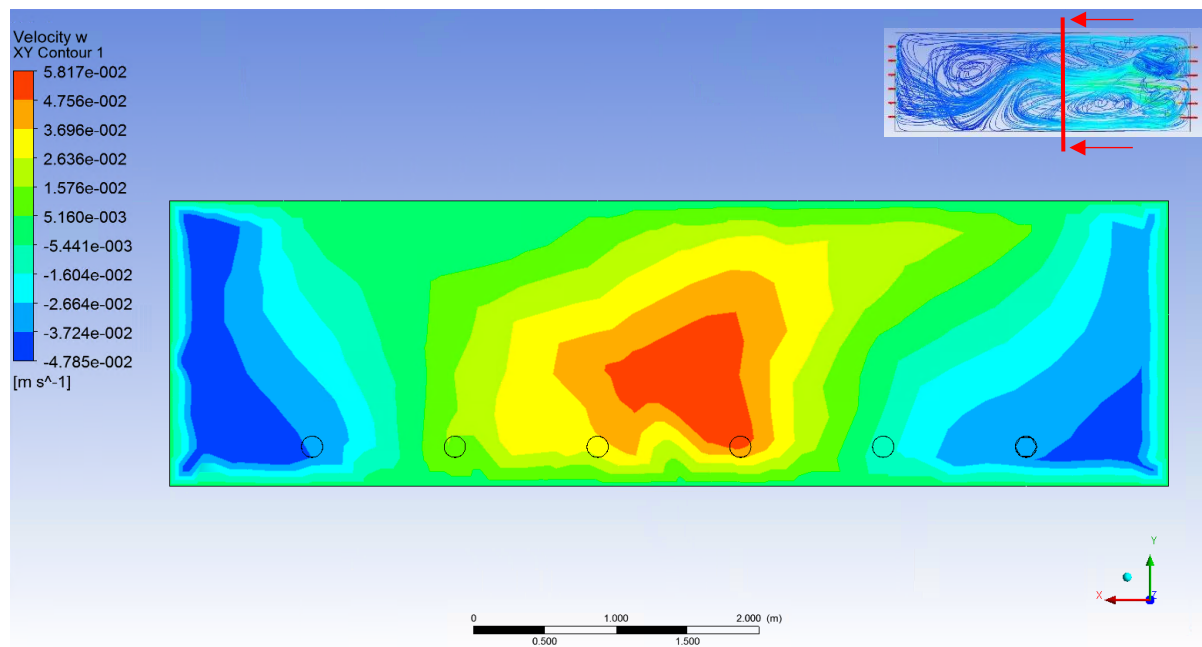


Obr. 4.3: Prvotní řešení pro Var.1 “Classic” – trajektorie proudnic pomocí Ansys Fluent - axonometrický pohled

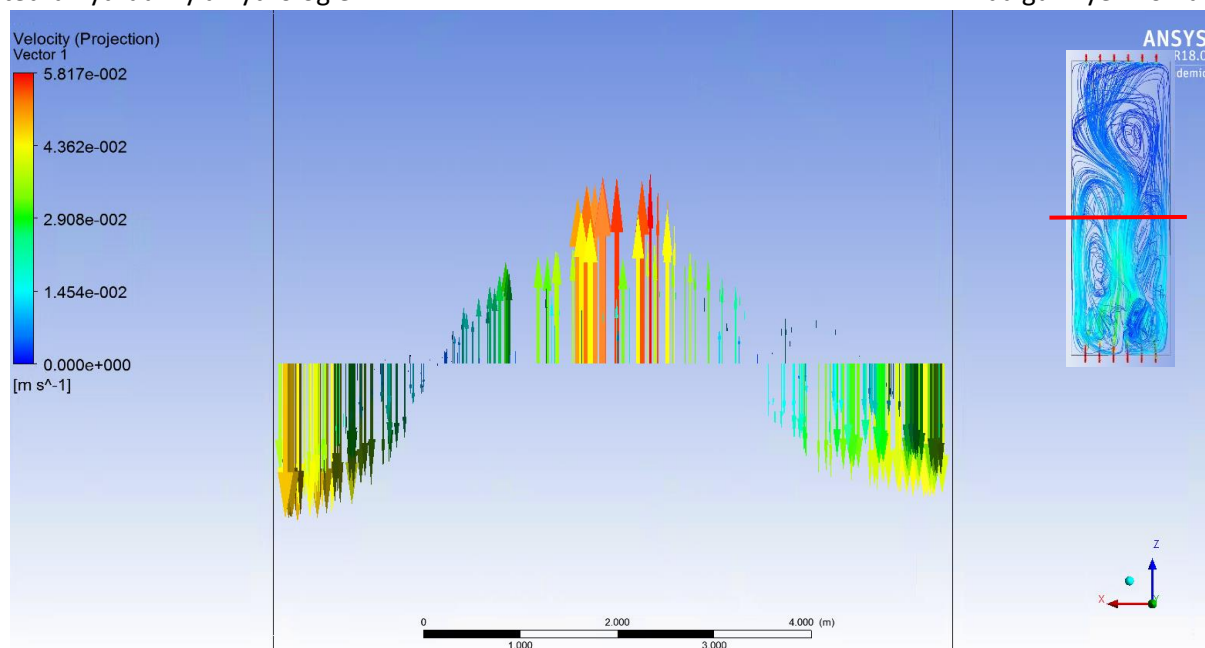
Mrtvé zóny je možné též rozeznat podle charakteristických vírů vznikajících podél hlavního toku (viz. Obr. 4.1 a 4.2). Tyto víry se prostorově nacházejí jak u hladiny, tak i u dna. Osa otáčení těchto vírů je orientována kolmo na hlavní proud, viz. Obr. 4.4. Vírové struktury proudu v rovině kolmé na hlavní proud tedy zjevně nemohou být mrtvými zónami.



Obr. 4.4: Trajektorie proudnice pro Var.1 Classic – pohled na bazén shora



Obr. 4.5: Rychlostní pole průřezu ve vzdálenosti 9 m od vstupu pro Var.1 Classic, pohled ve směru hlavního proudu v bazénu



Obr. 4.6: Vektory rychlostí ve směru hlavního proudu v průřezu ve vzdálenosti 9 m od vstupu -Var.1 Classic,

Jak je vidět na Obr. 4.5 a 4.6, víry mrtvých zón obsahují tzv. *vratné proudy*. To jsou proudy se směrem orientovaným opačně než směr hlavního proudu. V zásadě, vratné proudy vznikají v důsledku nárazu na stěnu, nebo na tok orientovaný kolmo, nebo na tok protisměrný. Logicky lze tedy říct, že průtok vody ve vratném proudu je cirkulován a po nějakou dobu se nezúčastní postupné výměny vody v bazénu. Intenzitu vratného proudu lze vztáhnout k rychlostní difference v průřezu hlavního proudu. Voda v proudu, která nestačí odtékat – ať už z důvodu nárazu na kolmou stěnu nebo proud či protiproud, se vrací ve vodě obsažené ve vratném proudu. Čím více vody v hlavním proudu nestačí odtékat ve směru tohoto proudu, tím více vody se musí vrátit zpět vratným proudem a tím bude větší rozdíl mezi maximem rychlosti ve směru hlavního proudu a rychlosti ve směru opačném (směr proudu je rozlišen negativní hodnotou).

4.2.1. Hledání mrtvých zón pomocí kritéria maxima difference rychlostí v rovině hlavního proudu

V předložené bakalářské práci bude využito výše uvedené vazby mezi rozdílem rychlosti v rovině kolmé na hlavní proud a přítomnosti vratných proudů, v nichž je cirkulována část objemu vody, jejíž výměna v bazénu se tím značně zpomalí.

Maximum rychlosti v rovině hlavního proudu bude určeno z rozdělení normálových složek rychlostí k rovině kolmé na hlavní proud (viz. Obr. 4.5). Pro výpočet maxima rozdílu rychlostí v dané rovině bude využito maximální lokální rychlosti ve směru proudu v rámci celého příčného profilu kolmého na směr hlavního proudu a maximální rychlosti v opačném směru, která indikuje přítomnost vratného proudu.

5 ZÁKLADY MATEMATICKÉHO MODELOVÁNÍ PRO ÚČELY CFD ANALÝZY

5.1 Pojem CFD

Výpočetní dynamika tekutin (angl. computational fluid dynamics) – je oblast mechaniky kontinua tekutin, využívající pro výpočet charakteristik proudění tekutin nejrůznější matematické a numerické techniky s využitím výkonných počítačů.

5.2 Základní principy

Základním prvkem v oblasti výpočetní dynamiky tekutin je definice řídicích rovnic mechaniky kontinua (pohybové rovnice), mezi které patří pro izotermní proudění:

- a) Rovnice kontinuity/spojitosti;
- b) Rovnice zachování momentu hybnosti;

Rovnice zachování momentu hybnosti může mít různý tvar v závislosti na přítomnosti nebo absence tření. Navier - Stokesovy rovnice se používají pro případ reálných tekutin s třením, zatím co Eulerova rovnice tření neuvažuje. V závislosti na podmínkách zkoumané prostředí můžeme kontinuum považovat jako stlačitelné nebo nestlačitelné. Ve druhém případě se rovnice značně zjednoduší.

Tyto rovnice popisují model pohybu kontinua. V závislosti na specifičnosti úlohy model může být doplněn rovnicemi popisujícími turbulence, přenos hmoty, chemickou reakci, fázové rozhraní, elektromagnetický vliv atd.

Pro zmíněné vlivy můžeme uvést vztahy, které tvoří soustavu nelineárních diferenciálních rovnic druhého řádu. Soustava má analytické řešení pouze v jednoduchých případech, když Reynoldsovo je číslo pro danou úlohu dost malé a geometrie není komplikovaná. V případě simulace reálného procesu se provádí tzv. *diskretizace* problému v prostoru a čase takovým způsobem, že oblast proudění se rozdělí do konečného počtu výpočetních buněk a pro nestacionární jevy se výpočet provádí v časových úrovních se zvoleným časovým krokem. Existuje několik různých způsobů řešení soustavy rovnic z hlediska jejich geometrické diskretizace například:

- a) Metoda konečných rozdílů;
- b) metoda konečných objemů;
- c) metoda konečných prvků.

5.3 Postup řešení

Pro popis postupu řešení jakékoliv úlohy v programu Ansys Fluent je potřeba zmínit jednotlivé výpočetní kroky:

1. Příprava vstupů (preprocessing) – zde se definuje geometrie pro daný problém včetně důležitých oblastí , diskretizace oblasti přípravou výpočetní sítě (mesh generation), definice důležitých fyzikálních parametrů a vlastností prostředí, volba počátečních a okrajových podmínek typických pro daný problém.
2. Výpočet – v této fázi program řeší diskretizovanou úlohu pomocí zvolené výpočetní metody za pomoci vhodných algoritmů. Výstupem jsou důležité veličiny a charakteristiky popisující prostředí daného kontinua (rychlost, tlak, hustota, teplota, entropie atd.), které jsou získány na základě zvolené prostorové diskretizace. V rámci náročnosti dané úlohy z hlediska potřeby výpočetního času lze uvažovat o využití technik paralelizace výpočtu, kdy se numerické řešení problému rozdělí na více výpočetních strojů (CPU), čímž se řešení může značně zrychlit.
3. Analýza výsledků (postprocessing) – výsledky řešení se zobrazí v podobě vhodných grafů, tabulek a dalších vhodných zobrazovacích technik pro vizualizaci proudového pole, např. v podobě kontur (vrstevnic), vektorů a trajektorií v závislosti na zvolené prostorové diskretizaci.

5.4 Stručný popis některých používaných metod

5.4.1 Metoda konečných rozdílů

Metoda konečných rozdílů se vyznačuje snadným programováním. V současné době se používá jen v některých specializovaných výpočetních kódech, pracujících pro nepříliš složité geometrie s velkou přesností.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial z} = 0,$$

Rov. 5.1: Diferenciální tvar rovnice konečných rozdílů

Kde **Q** – vektor veličiny zachování, **F**, **G** a **H** – toky veličin ve směru **x**, **y** a **z**.

5.4.2 Metoda konečných objemů

Metoda konečných objemů (angl. Finite Volume Method, FVM) je běžně používanou metodou zejména v oblasti výpočetní dynamiky tekutin. Má výhodu v nižších nárocích na výpočetní paměť a v rychlosti řešení. Další výklad pokračuje v kapitole 6.2.1.

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint Q dV + \iint F dA = 0,$$

Rov. 5.2: Rovnice konečných objemů

Kde \mathbf{Q} – vektor zachovávaných veličin, \mathbf{F} – vektor toků veličin, V – objem řídicího výpočetní buňky, A – povrchová plocha výpočetní řídicí buňky.

5.4.3 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků se používá při strukturální analýze tuhého kontinua, ale je též využitelná pro analýzu tekutin. Formulace metody však vyžaduje zvýšenou opatrnost pro zajištění konzervativního řešení. Přesto je metoda stabilnější, než metoda konečných objemů, ale vyžaduje větší operační paměti a delší výpočetní dobu než metoda konečných objemů.

$$R_i = \iiint W_i Q dV^e$$

Rov. 5.3: (rovnice konečných prvků)

Kde R_i – zbytková rovnice na vrcholu prvku i , Q – rovnice zachování, W_i – váhový koeficient, V^e – objem elementu.

5.5 Model turbulence

Jedním ze základních cílů numerického modelování chování turbulentního proudu je získání modelu, kterým je možno stanovit požadované veličiny, např. rychlosti tekutiny, za účelem inženýrského návrhu hydraulické konstrukce. Vliv různých zúčastněných charakteristických měřítek turbulence a složitost turbulentního jevu jako celku způsobuje, že jejich kompletní výpočet je neúnosně náročný a prakticky tedy nemožný. V takových případech prvotní přístup spočívá v návrhu numerických modelů, které dávají určité přiblížení plně neřešitelného turbulentního proudění. V této práci byl pro řešení turbulence použit přibližný model *Boussinequovy hypotézy*.

Podle této hypotézy jsou Reynoldsova napětí úměrná středním gradientům rychlosti obdobně, jako u vazkých napětí (Newtonův zákon). Konstantou úměrnosti je turbulentní viskozita μ_t .

$$\tau_t = -\rho \overline{u'v'} = \mu_t \frac{\partial u}{\partial y}$$

Rov. 1.4: (rovnice turbulentní viskozity)

Pro popis turbulentního proudění je použit dvourovnicový model turbulence k-ε.

Tento model ve variantě „Standard“ patří k nejznámějším a v inženýrské praxi nejvyužívanějším modelům určeným k modelování turbulentního proudění. Mezi jeho výhody při modelování přenosu hybnosti a tepla patří ekonomičnost výpočtu a dostatečná přesnost pro široký rozsah typů turbulentního proudění. Hlavním předpokladem řešení daného modelu je plně vyvinuté turbulentní proudění a zanedbatelnost molekulární viskozity. Je vhodný na případy volného smykového proudění s malými gradienty tlaku.

6 PŘÍPRAVA K MODELOVÁNÍ

6.1 Geometrie

Před samotným zahájením procesu výpočtu musíme připravit několik různých variant rozmístění vtoků a výtoků do bazénu. Varianty se budou lišit podle:

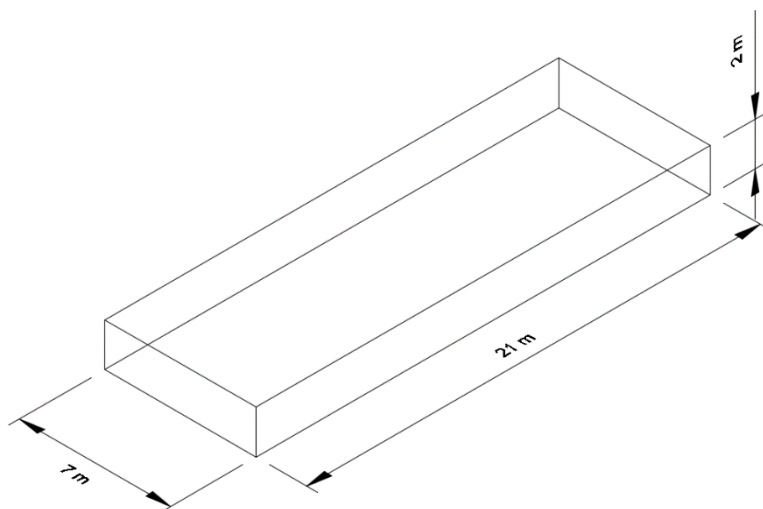
- a) Stěň bazénu, na které je umístěn vtok/výtok;
- b) Počtu vtoků/ výtoků v jedné řadě;
- c) Vzájemné osové vzdálenosti mezi jednotlivými vtoky/výtoky a jejich polohy na stěně bazénu.

Pro počáteční fázi výpočtu byly zvoleny základní varianty rozmístění vtoků/výtoků s ohledem na přehlednost a možnost zkoumání vlivu těchto rozmístění na vznik a rozsah mrtvých zón. Po získání prvotních výsledků bude možné posoudit, která z variant umožňuje dosáhnout další optimalizací vhodnějších hydraulických podmínek pro rovnoměrnou výměnu vody v bazénu.

Taky v prvních krocích musíme brát na vědomí, že počáteční varianty byly zvoleny zejména pro přehlednost a hledání závislostí mezi rozmístěním trysek a tvorbou mrtvých zón. Po dosažení prvních výsledků bude zřejmé, jaké varianty rozmístění volit dál pro dosažení lepších výsledků.

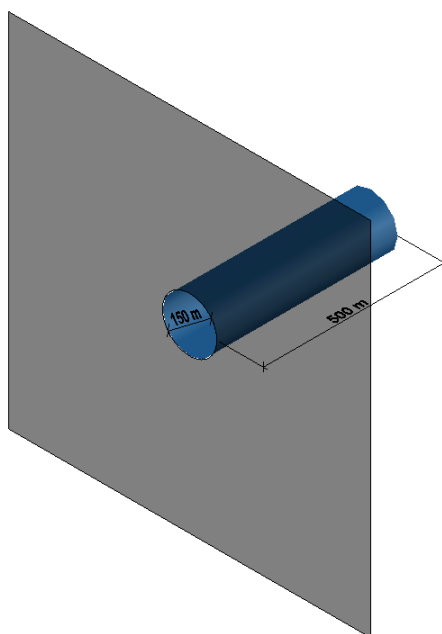
6.1.1 Parametry bazénu, vpusti, výpusti

Problematika eliminace mrtvých oblastí bude studována pro případ prizmatického bazénu s délkou $L = 21$ m, šířkou $B = 7$ m a hloubkou $h = 2$ m. Pro zjednodušení modelovacího přístupu bude volná hladina nahrazena podmínkami proudění u stěny.

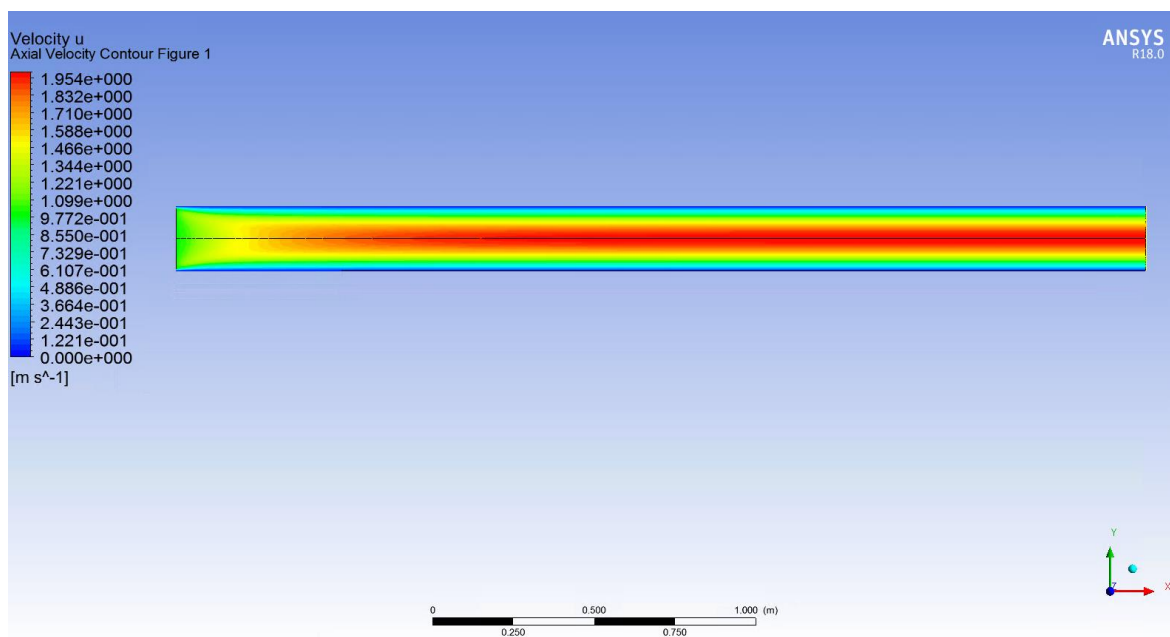


Obr. 6.1: Rozměry bazénu

Vtoky a výtoky budou realizovány jako kruhové otvory o průměru 150 mm včetně krátkých úseků potrubí délky 500 mm. (viz Obr. 6.2). Snahou je, aby se podmínky na vstupu (rychlostní pole, tlak, kinetická energie a její disipace) do bazénu alespoň částečně blížily realitě (viz Obr. 6.3 – simulace v přímém potrubí).



Obr. 6.2: Úsek vstupního/výstupního potrubí do bazénu



Obr. 6.3: Vývoj rychlostního pole v přímém potrubí

6.1.2 Varianty rozmístění vtoků a výtoků

Základní varianty uspořádání vtoků/výtoků v bazénu jsou tyto:

- Var.1 Classic – jednoduché uspořádání vtoků a výtoků vedle sebe;
- Var.2 Turned – představuje rozmístění vtoků, získané otočením varianty *Var.1 Classic*;
- Var.3 Combined – pokus o nestandartní rozmístění.

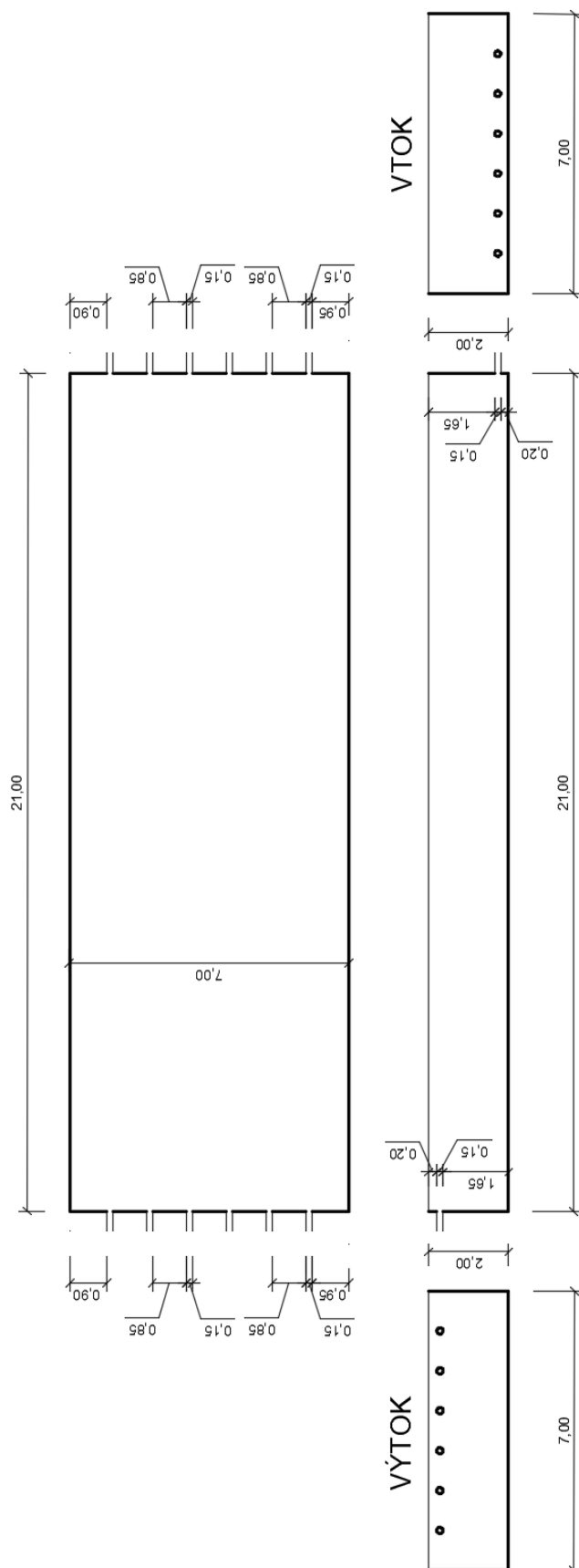
V první variantě bude realizováno klasické rozmístění. Přítok vody zespoda na jedné kratší straně a odběr na opačné stěně nahoře. Dohromady je zde rozmístěno po 6 vtokových a 6 výtokových míst na obou čelních stěnách bazénu. Vzdálenost mezi výústími je pravidelná. Odpovídající si páry vtokových a výtokových otvorů v obou stěnách jsou navzájem paralelní v souladu s Obr. 6.4.

Druhá varianta se bude lišit pouze tím, že vyústění vtokových/výtokových míst bude situováno na delších stěnách. Z toho důvodu bude i jiná osová vzdálenost mezi jednotlivými výústími vtokových/výtokových míst. (Viz. Obr. 6.5).

Na Obr. 6.6 je vidět poloha a vzdálenosti otvorů a také zda se jedná o vtok či výtok v souladu s třetí variantou geometrie rozmístění. Celkem je zde 18 vtokových míst, to je 6 v každé řadě. Po jedné řadě je umístěno na obou delších stěnách bazénu a jedna řada ve dně uprostřed. Výtoky jsou na kratších stěnách, to je jedna řada po 9 odtocích na každé stěně.

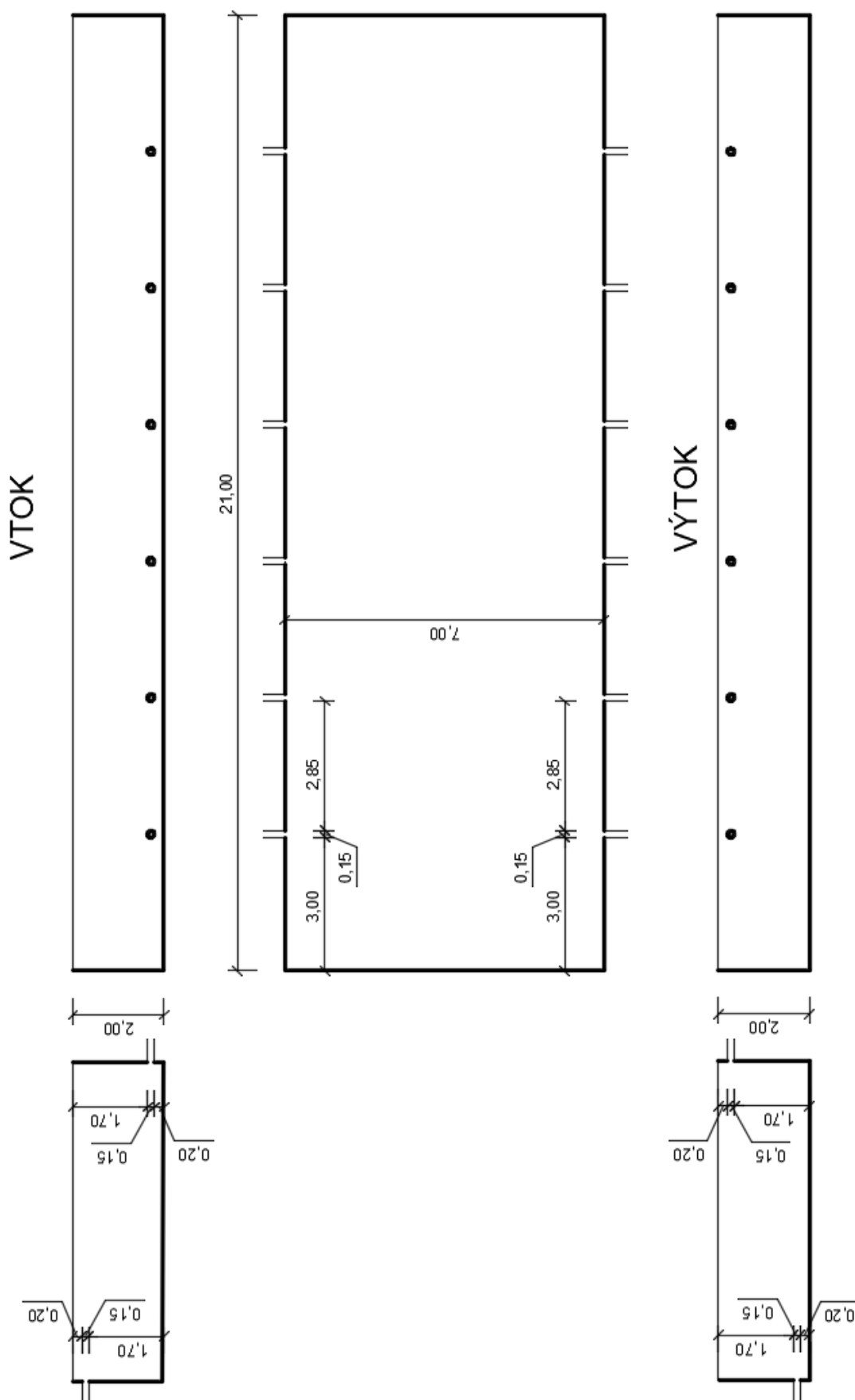
Kromě základních variant budou vytvořeny další 2 varianty se stejnou geometrií jako Var.1 a Var. 2, které zachycují možnost úpravy vtokové rychlosti pro dosažení vhodnějších hydraulických podmínek v bazénu. Umožní se tak demonstrovat vliv přerozdělení průtoku za účelem získání vyrovnanějších podmínek proudění – i z hlediska kritéria maxima rozdílu rychlostí. Podrobnější výklad je popsán v kapitole 8.3.

Var.1 Classic



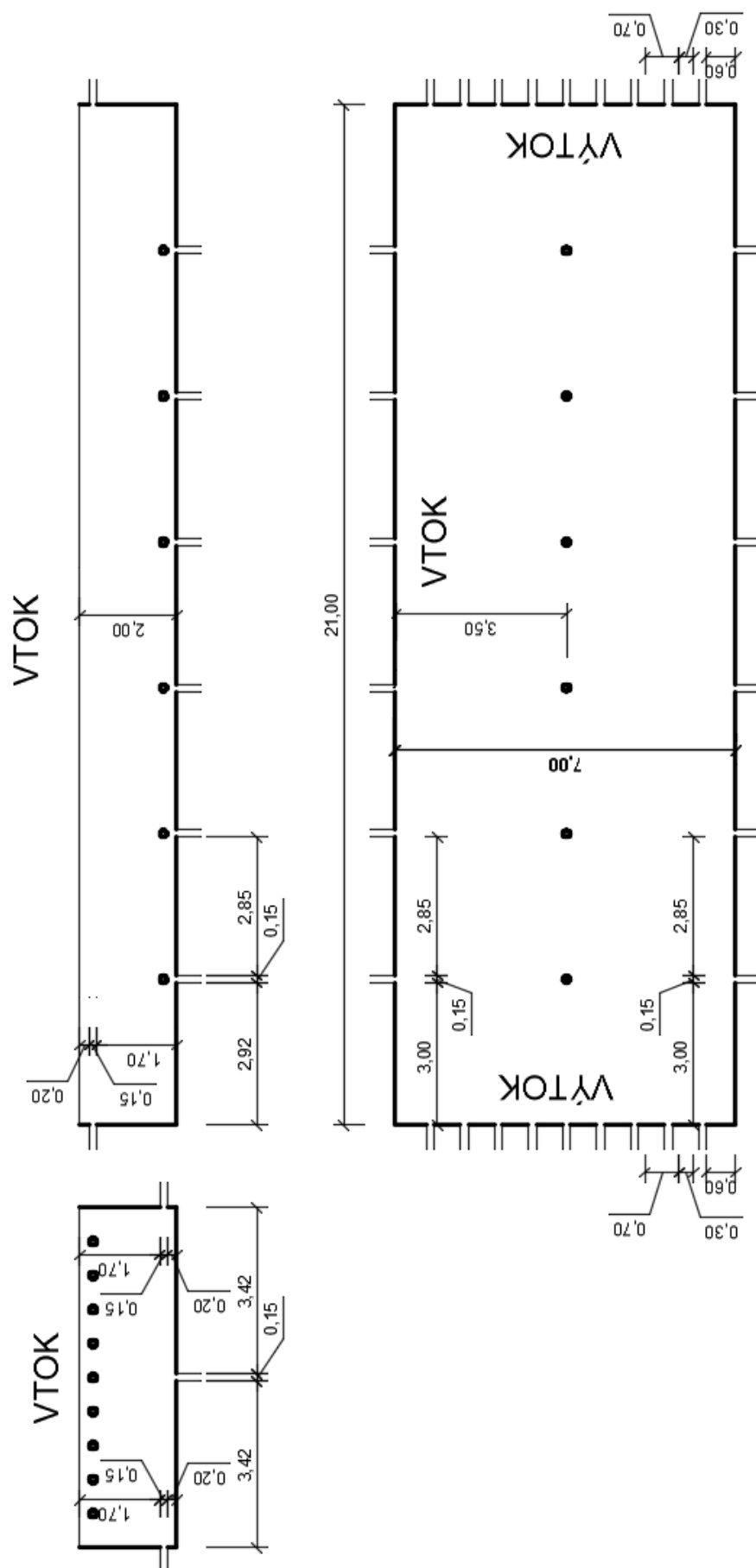
Obr. 6.4: Schéma rozmístění vtoků a výtoků pro Var.1

Var.2 Turned



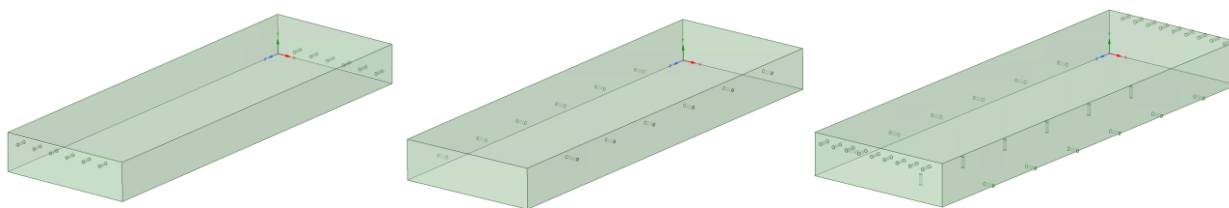
Obr. 6.5: Schéma rozmístění vtoků a výtoků pro Var.2

Var.3 Combined



Obr. 6.6: Schéma rozmístění vtoků a výtoků pro Var.3

Geometrie všech tří variant je vytvořena v podprogramu *SpaceClaim* v souladu s Obr. 6.7.



Obr. 6.7: 3D - geometrie modelu bazénu pro všechny 3 základní varianty

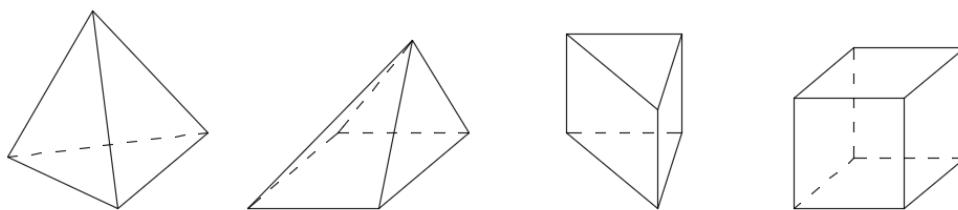
6.2 Výpočetní síť

6.2.1 Obecné informace

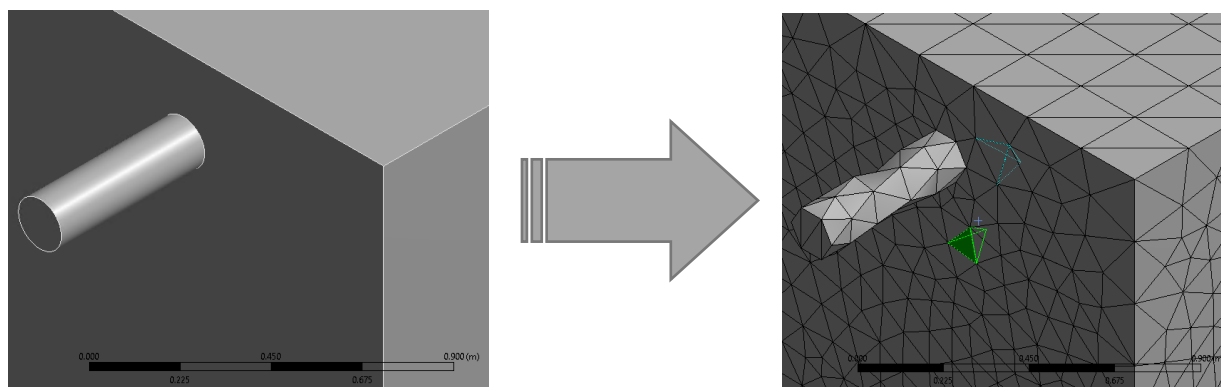
Aby výpočetní program dokázal správně interpretovat vytvořenou geometrii jako fyzicky omezený prostor, musíme připravit výpočetní síť, kterou tvoří soustava buněk. Pro řešení v této síti můžeme využít metodu konečných objemů (aplikovaná v ANSYS Fluent), o níž byla zmínka ve statí 5.4.2.

Metoda konečných objemů je numerická metoda sloužící k simulaci průběhů napětí, deformací, vlastních frekvencí, proudění tepla, jevů elektromagnetismu, proudění tekutin atd. na vytvořeném matematickém modelu. Její princip spočívá v diskretizaci spojitého kontinua do určitého (konečného) počtu objemových prvků, přičemž zjišťované parametry jsou určovány v uzlových bodech každé z těchto buněk a vytvářejí tak tzv. *výpočetní síť*.

Buňky výpočetní sítě se mohou kombinovat tak, aby bylo dosaženo optimální sítě. Proto ve speciálním editoru v prostředí ANSYS FLUENT (mesh generator) jsou nástroje na úpravu tvaru, počtu a rozměrů jak jednotlivých buněk, tak i celé sítě. Zde jsou uvedeny některé nabízené tvary výpočetních objemových buněk:



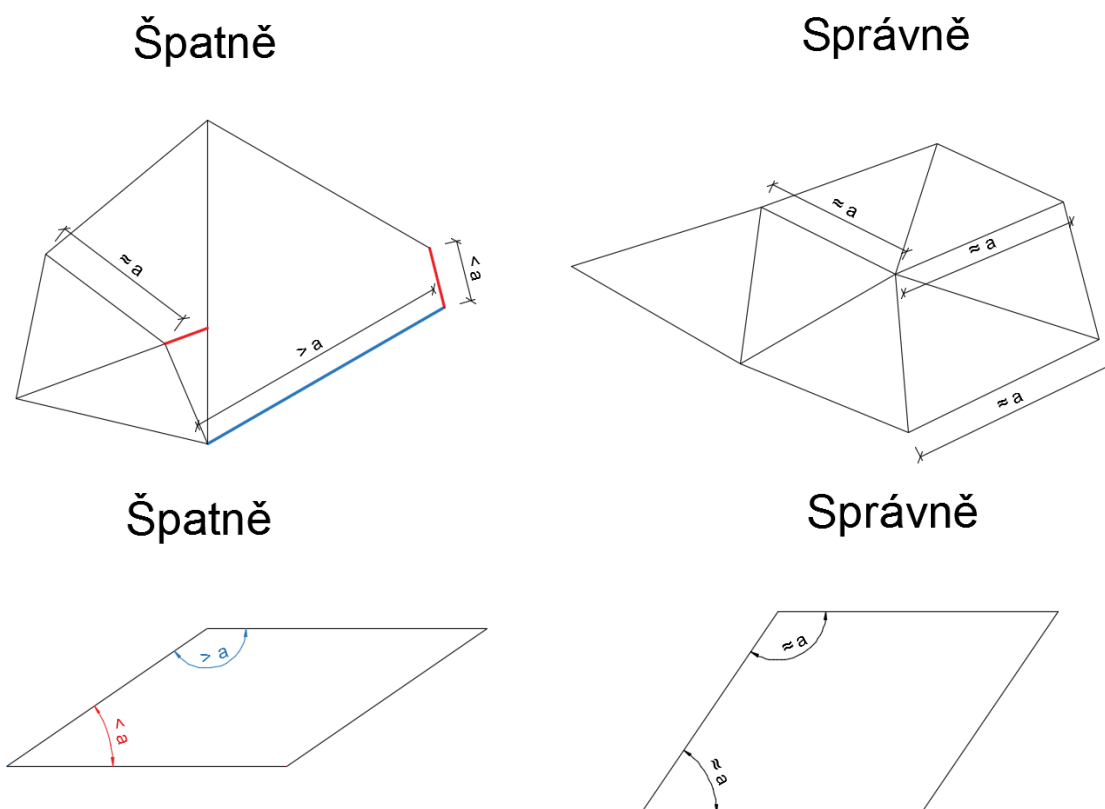
Obr. 6.8: Základní tvary 3D výpočetních buněk: čtyřstěn, jehlan, pětistěn, šestistěn



Obr. 6.9: Geometrie před a po generaci výpočetní sítě

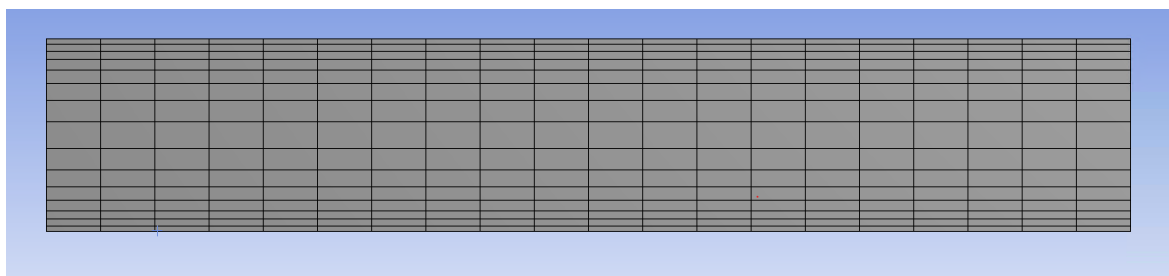
6.2.2 Kvalita výpočetní sítě

Pro dosažení přesných výsledků a vytvoření modelu odpovídajícího realitě musíme sledovat kvalitu vytvořené výpočetní sítě. Špatná kvalita sítě vede k nepřesným výsledkům a/nebo pomalé konvergenci, případně k divergenci problému. Pro stanovení kvality sítě potřebujeme zavést pojem „nesouměrnost“. Asymetrie a nepravidelnost buněk vede ke ztrátě přesnosti výpočtů a vede k chybám. Nesouměrnost buněk můžeme určit na základě rovnostrannosti buněk a odchylce od normalizovaného úhlu:



Obr. 6.10: Příklady špatného a správného tvaru buněk

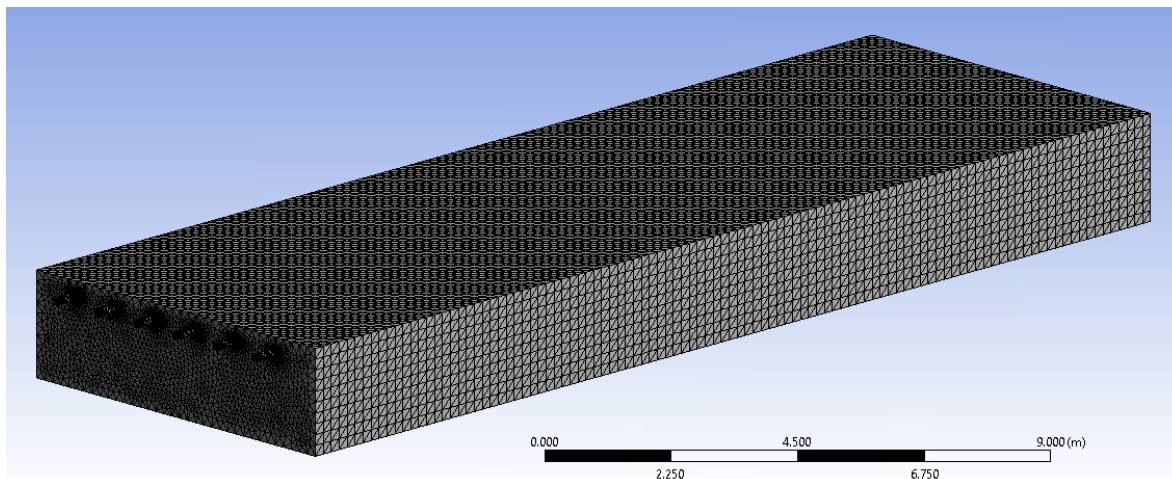
Vzhledem k tomu, že dopočítané hodnoty jsou „zachovány“ ve středu buňky, v zájmových oblastech, kde potřebujeme nejpřesnější a nejdetailnější výsledky, je třeba zahustit síť. Přejít mezi velkými a menšími buňkami musí být plynulý, bez náhlých změn rozměrů buněk.



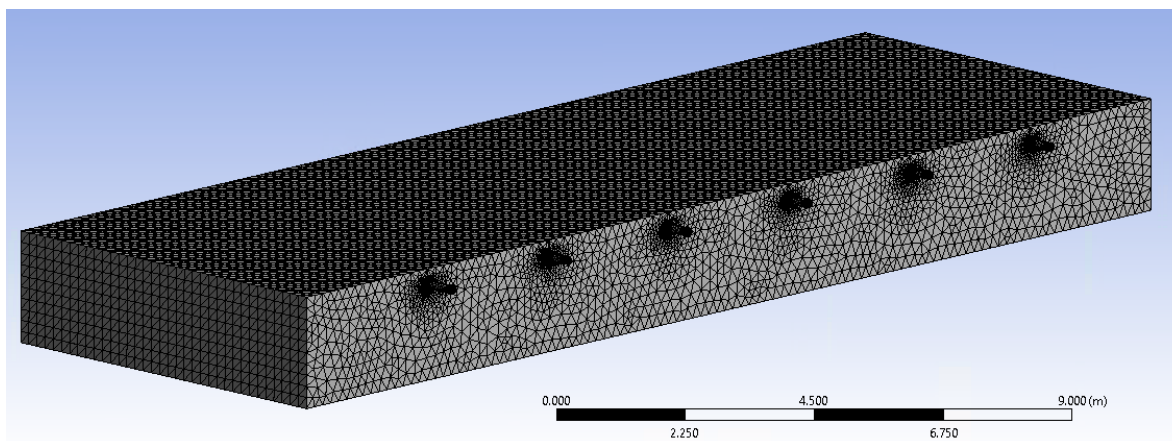
Obr. 6.11: Příklad správně zahustěné sítě

6.2.3 Aplikace

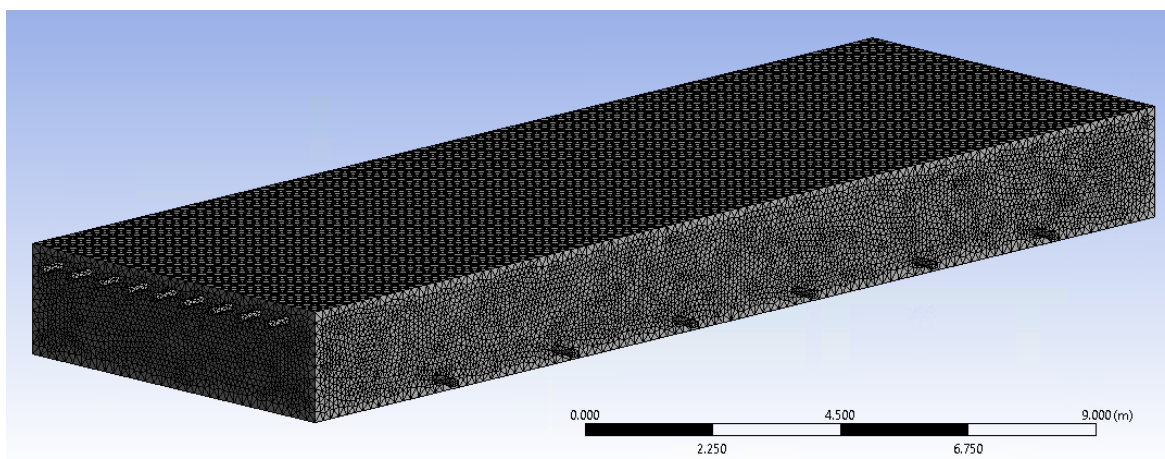
Po načtení vytvořených geometrií varianty 1, 2 a 3, viz. kapitola 6.1.2, byly nastaveny parametry rozměrů výpočetních buněk a sítí tak, že celkový počet prvků činí 217346, 221233 a 602654 buněk v souladu s variantami *Classic*, *Turned* a *Combined* (viz. Obr. 6.12, 6.13, 6.14)



Obr. 6.12: Výpočetní síť pro Var.1 Classic



Obr. 6.13: Výpočetní síť pro Var.2 Turned



Obr. 6.14: Výpočetní síť pro Var.3 Combined

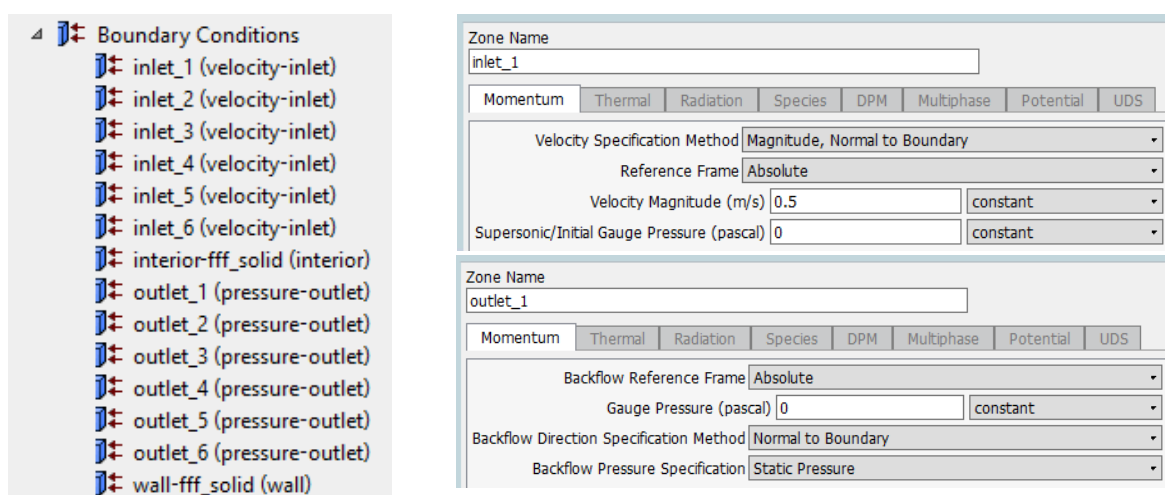
6.3 Okrajové podmínky

Obecně pro řešení úlohy proudění v bazénu, existují dvě okrajové podmínky, to jsou:

- Okrajová podmínka na hranici oblasti, tedy na rozhraní stěn a vody a hladiny;
- Okrajové podmínky pro samotnou oblast proudu – to je oblast náplně bazénu.

Z lepší třídění okrajových podmínek podle postupu jejich nastavení v programu:

- Vstupní podmínka rychlosti – určuje rychlost na vstupech do bazénu je rozdělená do 6-ti vtokových míst pro lepší manipulaci (výjimkou je Var.3 Combined – 18 vtoků);
- Podmínka na stěnách – určuje míru tření o drsný povrch stěn bazénu a překlenutí popisu proudění v mezní vrstvě pomocí tzv. standardní stěnové funkce;
- Výstupní podmínka tlaku – určuje tlak na výtoku v 6 místech pro první a druhou variantu, resp. pro 18 míst pro třetí variantu geometrie bazénu.



Obr. 6.15: Ukázka nastavení okrajových podmínek

Pro varianty 1 a 2 je jako podmínka vstupní rychlosti do bazénu uvažováno 0,5 m/s, resp. 0,167 m/s pro variantu 3, což v potrubí o průměru 150 mm dává průtok 8,83 l/s, resp. 2,95 l/s pro každý ze vtoků. Celkem tedy do bazénu pro každou z uvažovaných geometrických variant přitéká 53 l/s.

Okrajová podmínka na výtoku je definována jako nulový statický tlak.

Velikost výchozí turbulentní intenzity byla pro všechny varianty nastavena konstantní hodnotou 5 % v celé oblasti proudění.

6.4 Parametry modelu

Jedním ze základních parametrů nastavení modelu je nastavení parametrů řešiče. Program nabízí 3 typy nastavení: čas, vztah rychlosti a typ základního řešiče. Problém považujeme za časově ustálený, rychlosti v absolutním systému a typ řešiče nastavujeme na základě tlaku.

Ve zvoleném souřadném systému budeme také uvažovat gravitační zrychlení ve směru osy Y hodnotou -9.807 m/s^2 . (viz. Obr. 6.16)

Obr. 6.16: Ukázka nastavení základních parametrů modelu

Další krokem byl výběr vhodného modelu popisujícího proudění v bazénu. Z možnosti výběru, který poskytuje program, nastavíme pouze viskozitu, poněvadž v nabídce nic dalšího markantně ovlivňovat tvorbu mrtvých zón v bazénu nebude. Viskózní model proudění budeme uvažovat **k- ϵ** . O tomto modelu bylo zmíněno v kapitole 5.5. Všechny ostatní parametry související s nastavením turbulentního modelu bude ponechany podle standartní nabídky programu. (Viz. Obr. 6.17).

Obr. 6.17: Ukázka nastavení turbulentního modelu

V programu je přiřazená „knihovna materiálů“, ze které lze volit parametry tekutiny vyplňující výpočetní oblast proudění. V tomto případě je tekutinou voda (viz. Obr. 6.18)

Name	water-liquid	Material Type	fluid
Chemical Formula	h2o<l>	Fluent Fluid Materials	water-liquid (h2o<l>)
		Mixture	none
Properties			
Density (kg/m3)	constant	Edit...	
	998.2		
Viscosity (kg/m-s)	constant	Edit...	
	0.001003		

Obr. 6.18: Ukázka nastavení materiálu

Nastavení kontroly řešení a dalších parametrů řešiče jsou ponechány bez větších změn (viz. Obr. 6.19).

Solution Methods	Solution Controls
Pressure-Velocity Coupling	Under-Relaxation Factors
Scheme	Pressure
SIMPLE	0.5
Spatial Discretization	Density
Gradient	1
Least Squares Cell Based	Body Forces
Pressure	1
Second Order	Momentum
Momentum	0.3
Second Order Upwind	Turbulent Kinetic Energy
Turbulent Kinetic Energy	0.8
First Order Upwind	Turbulent Dissipation Rate
Turbulent Dissipation Rate	0.8
First Order Upwind	Turbulent Viscosity
	1

Obr. 6.19: Parametry nastavení řešiče

7 SIMULACE

Po nastavení všech potřebných parametrů v krocích uvedených výše můžeme nastavit i parametry simulace a spustit vlastní výpočet.

7.1 Nastavení přesnosti řešení pomocí reziduí

Jedním ze způsobu získání přesnějších výsledků je nastavení menších velikosti reziduí. Pro danou úlohu stačí nastavit přesnost na hodnotu reziduí $1E-6$ (viz. Obr. 7.1).

Residual	Monitor	Check	Convergence	Absolute Criteria
continuity	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1e-6
x-velocity	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1e-6
y-velocity	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1e-6
z-velocity	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1e-6
k	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1e-6
epsilon	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1e-6

Options: ☒ Print to Console, ☒ Plot, Window: 2, Iterations to Plot: 1000, Iterations to Store: 1000.

Residual Values: ☐ Normalize, ☒ Scale, ☐ Compute Local Scale. Iterations: 5.

Convergence Criterion: absolute. Convergence Conditions...

Obr. 7.1: Nastavení reziduí

7.2 Spouštění a průběh výpočtů

Posledním krokem před zahájením vlastních výpočtů je inicializace řešiče. Z pohledu uživatele tato část nevyžaduje žádnou změnu v nastavení (viz. Obr. 7.2).

Solution Initialization

Initialization Methods

☒ Hybrid Initialization

☐ Standard Initialization

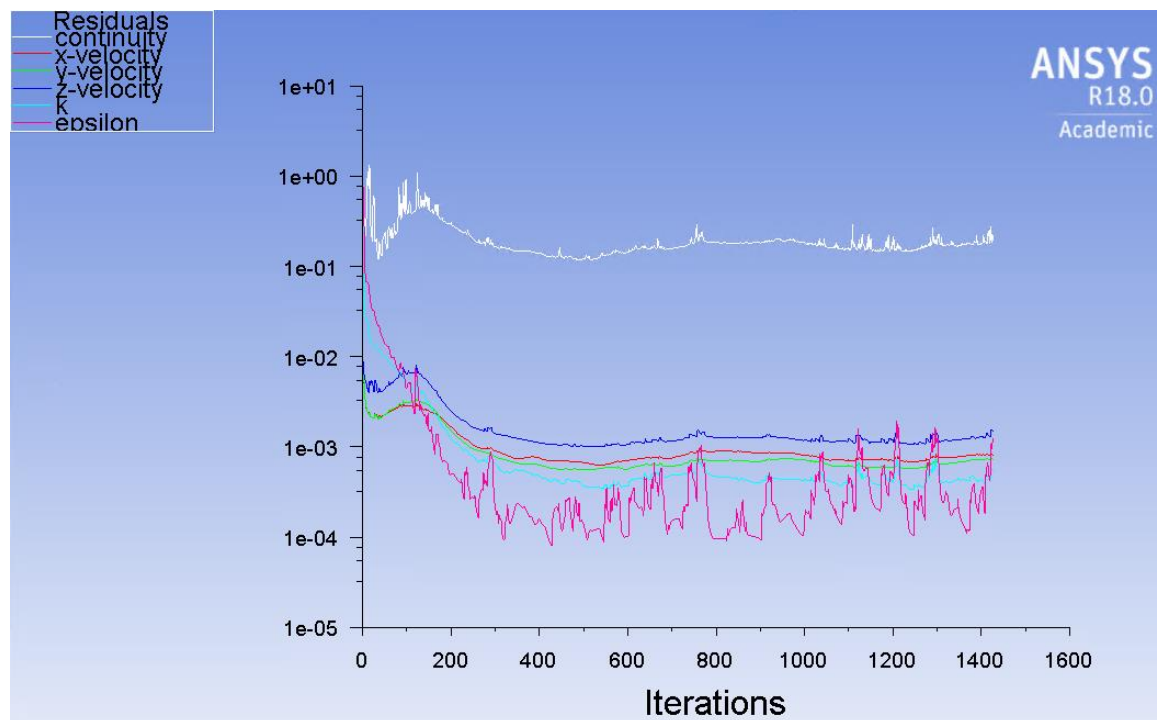
More Settings... Initialize

Patch...

Reset DPM Sources Reset Statistics

Obr. 7.2: Dialog pro funkci inicializace řešení

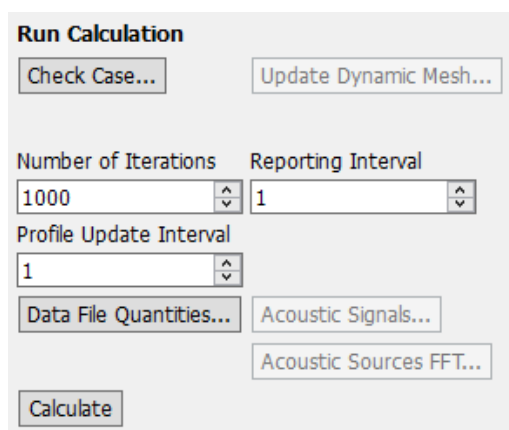
Samotný průběh výpočtu v programu ANSYS FLUENT představuje graf (viz. Obr. 3.3) a souběžně poskytovaný výpis hodnot reziduí pro jednotlivé provedené iterace (viz. Obr. 7.4). Iterace představují jednotlivé pokusy o dosažení správného řešení. Jejich počet můžeme nastavit v příslušném dialogovém okně (viz. Obr. 7.5).



Obr. 7.3: Graf průběhu změny reziduí pro Var.1 Classic

iter	continuity	x-velocity	y-velocity	z-velocity	k	epsilon	time/iter
1426	1.9548e-01	8.1820e-04	7.2293e-04	1.4854e-03	5.4320e-04	1.2379e-03	0:00:00 1000
1427	2.6155e-01	8.1950e-04	7.2337e-04	1.3396e-03	4.8377e-04	9.3530e-04	1:06:36 999
1428	2.0557e-01	8.0715e-04	7.0971e-04	1.3077e-03	4.6016e-04	7.7442e-04	1:03:12 998
1429	2.7286e-01	8.0928e-04	7.1071e-04	1.2989e-03	7.2393e-04	1.5958e-03	0:57:10 997
1430	2.1376e-01	8.8904e-04	7.9675e-04	1.6913e-03	6.3684e-04	1.2342e-03	0:55:39 996
1431	1.9456e-01	8.6124e-04	7.7184e-04	1.6860e-03	6.3584e-04	1.3769e-03	0:51:06 995
1432	2.4540e-01	8.4871e-04	7.5564e-04	1.6064e-03	6.3557e-04	1.4356e-03	0:50:47 994
1433	3.1868e-01	8.5233e-04	7.4883e-04	1.5931e-03	6.2073e-04	1.3987e-03	0:50:31 993
1434	2.2734e-01	8.2913e-04	7.2784e-04	1.5195e-03	6.1639e-04	1.2921e-03	0:46:59 992
1435	1.9142e-01	8.0874e-04	7.1854e-04	1.5044e-03	6.6011e-04	1.6415e-03	0:47:28 991

Obr. 7.4: Výpis hodnoty reziduí pro Var.1 Classic



Obr. 7.5: Dialogové okno pro spouštění výpočtů

7.3 Ověření výsledků

Po vyčerpání nastaveného počtu iterací nebo splnění kritéria dosažení koncové hodnoty rezidia (co nastane dříve) musíme ověřit získané výsledky, jsou-li v dostatečném rozmezí odchylky přesnosti. Základním kritériem dostatečné shody je dosažení uspokojivě malého rozdílu mezi průtoky na vstupu a na výstupu, který by měl být teoreticky nulový. Nástroje postprocessingu v programu nám umožní tyto výsledky zobrazit:

Volumetric Flow Rate		Average of Facet Values Velocity Magnitude	
	(m ³ /s)		(m/s)
inlet_1	0.0087430038	inlet_1	0.5
inlet_2	0.008657096	inlet_2	0.5
inlet_3	0.0086571206	inlet_3	0.5
inlet_4	0.0086571557	inlet_4	0.5
inlet_5	0.0086571845	inlet_5	0.5
inlet_6	0.0086571971	inlet_6	0.5
outlet_1	-0.0085718011	outlet_1	0.49237326
outlet_2	-0.0086100758	outlet_2	0.49344235
outlet_3	-0.0086143226	outlet_3	0.50085396
outlet_4	-0.0085630829	outlet_4	0.50396674
outlet_5	-0.0085946405	outlet_5	0.49503258
outlet_6	-0.0086000052	outlet_6	0.49847475
Net	0.00047482961	Net	0.49803397

Obr. 7.7: Výsledné průtoky a rychlosti v místech vstupu a výstupu pro Var.1 Classic

Souhrny a porovnání některých teoretických a modelovaných parametrů s procentuální odchylkou jsou uvedeny v následující tabulce:

Tabulka 7.1: Přehled porovnávaných parametrů Var.1 Classic na vstupu/výstupu (pozn. Q1 průměrný přítok/odtok jedním potrubím do/z bazénu)

V T O K			
Hodnoty	Teoretické	Modelované	Odchylka
ρ [kg/m ³]	998.2	998.2	0.00%
D [mm]	150.00	150.00	0.00%
Počet	6	6	0.00%
S [m ²]	0.0177	0.0173	2.02%
V_{okr} [m/s]	0.500	0.500	0.00%
Q1 [m ³ /s]	0.0088	0.0087	1.86%
ΣQ [m ³ /s]	0.0530	0.0520	1.86%
Q [l/s]	8.8357	8.6715	1.86%
ΣQ [l/s]	53.0144	52.0288	1.86%





V Ý T O K			
Hodnoty	Teoretické	Modelované	Odchylka
ρ [kg/m ³]	998.2	998.2	0.00%
D [mm]	150.00	150.00	0.00%
Počet	6	6	0.00%
S [m ²]	0.0177	0.0173	2.02%
V_{okr} [m/s]	0.5000	0.498	0.94%
Q1 [m ³ /s]	0.0088	0.0087	1.27%
ΣQ [m ³ /s]	0.0530	0.0523	1.27%
Q [l/s]	8.8357	8.7239	1.27%
ΣQ [l/s]	53.0144	52.3434	1.27%

Hodnota průměrné chyby je 1.62%. Chybu lze považovat za přípustnou a tím pádem výpočet za dostatečně přesný. Výsledky a jejich porovnání Var.2 Turned a Var.3 Combined jsou uvedeny na konci práce v kapitole 8.2.

8 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ (POSTPROCESSING)

Po dosažení přijatelně zkonvergovaného řešení proudění je možno získané výsledky vyhodnotit. V této kapitole je popsán postup, kterým lze zhodnotit s využitím nástrojů post-processingu v ANSYS FLUENT úspěšnost optimalizace proudění vedoucí k dosažení co nejvyrovnanějších hydraulických podmínek (minimum vratných proudů odpovídajících mrtvým zónám).

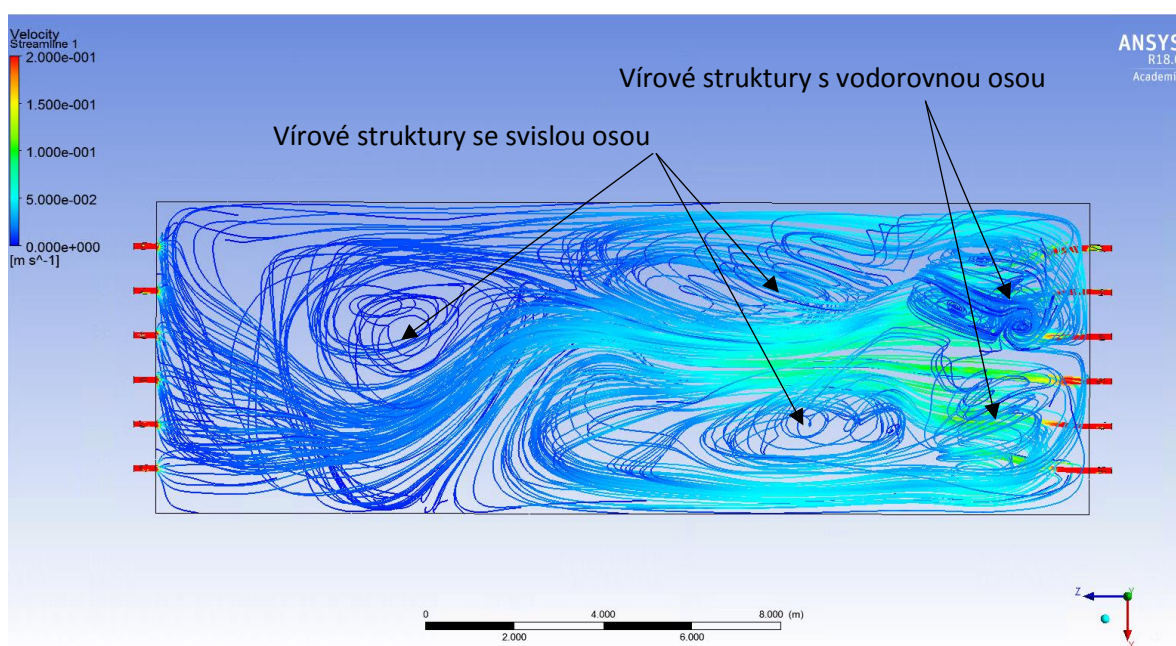
Zde je uvedeno i několik užitečných nástrojů post-processingu a jejich použití v práci pro přehlednější zobrazení pole rychlostí a charakteru proudu:

-  *Streamline* – nástroj zobrazující jednotlivé proudové trajektorie a jejich rychlosti v určitém místě. Pomocí tohoto nástroje je možno vizualizovat celkovou strukturu proudu a odhadnout polohu, rozsah a četnost výskytu mrtvých zón;
-  *Plane* – nástroj definující plochu v níž je provedeno zobrazení sledované veličiny;
-  *Contour* – ukazuje zobrazení rozložení veličiny v definované ploše v podobě vrstevnic;
-  *Vector* – vykresluje vektorové pole v dané rovině.

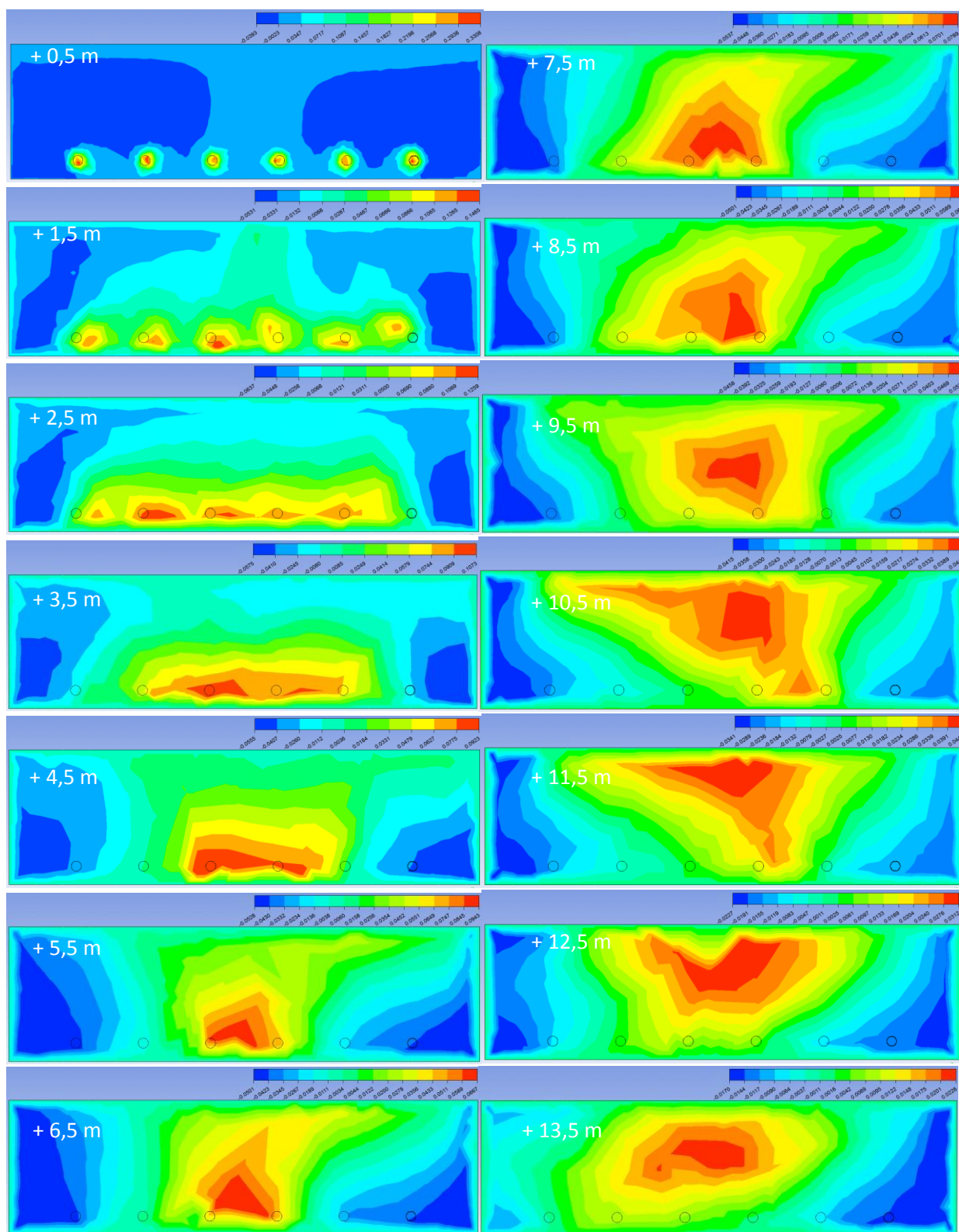
8.1 Aplikace nástroje Streamline

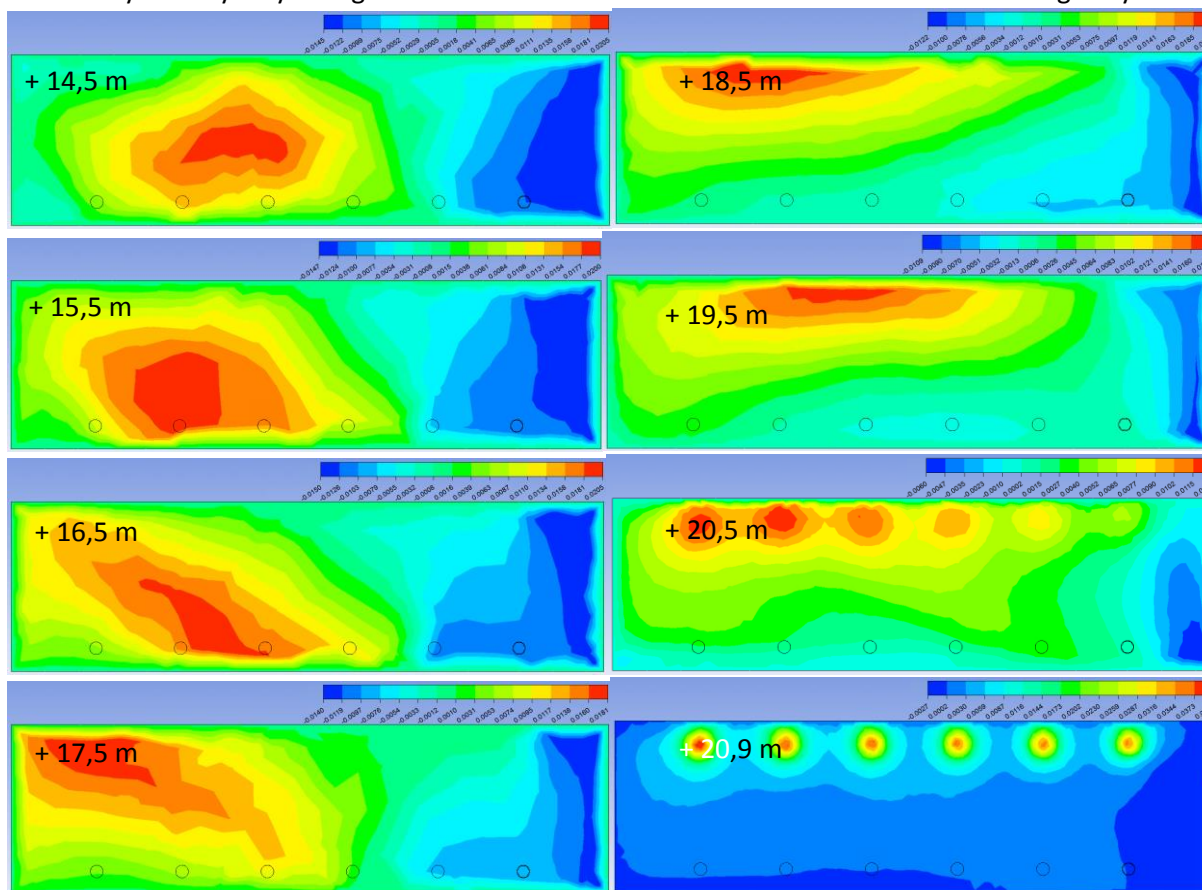
Pro definování mrtvých zón musíme najít oblasti víru:

Jak je vidět na obr. 8.1, cirkulační struktury vznikající těsně za vtokem do bazénu mají vodorovnou osu otáčení a nepovažujeme je tedy za mrtvé zóny, kdežto cirkulační struktury v rozmezí cca 4 m -13 m od vtoků a cca 3 m před výtokem z bazénu jsou cirkulačními víry se svislou osou otáčení, které mají charakter mrtvých zón.



Obr. 8.1: Charakteristické struktury proudu pro Var.1 Classic, pohled shora





Obr. 8.2: Vývoj rychlostního pole - pro Var.1 - Classic

8.2 Rozbor vírových oblastí

Pro detailnější popis vývoje struktury proudění je třeba použít nástroje Plane, Contour a Vector. V Obr. 4.1. je pro variantu Var.1 - Classic zobrazen vývoj rychlostního pole v příčných řezech kolmých na směr hlavního proudu tak, jak za sebou následují ve vzdálenostech vždy po 1m od vstupu až k výstupu z bazénu.

8.3 Ukazatel maxima rychlostních rozdílů

Podle zobrazených výsledků můžeme stanovit maximální rozdíl rychlostí v každém ze zobrazených profilů:

Tabulka 8.1: Přehled charakteristických rychlostí pro jednotlivé profily ve směru hlavního proudu- Var.1 Classic

Profil 1		Profil 2		Profil 3	
Vzdálenost od vtoku [m]	0.5	Vzdálenost od vtoku [m]	1.5	Vzdálenost od vtoku [m]	2.5
Maximální rychlost [m/s]	0.331	Maximální rychlost [m/s]	0.146	Maximální rychlost [m/s]	0.126
Minimální rychlost [m/s]	-0.039	Minimální rychlost [m/s]	-0.053	Minimální rychlost [m/s]	-0.064
Max. rozdíl rychlostí [m/s]	0.370	Max. rozdíl rychlostí [m/s]	0.199	Max. rozdíl rychlostí [m/s]	0.190

Profil 4		Profil 5		Profil 6	
Vzdálenost od vtoku [m]	3.5	Vzdálenost od vtoku [m]	4.5	Vzdálenost od vtoku [m]	5.5
Maximální rychlost [m/s]	0.107	Maximální rychlost [m/s]	0.092	Maximální rychlost [m/s]	0.094
Minimální rychlost [m/s]	-0.057	Minimální rychlost [m/s]	-0.056	Minimální rychlost [m/s]	-0.053
Max. rozdíl rychlostí [m/s]	0.164	Max. rozdíl rychlostí [m/s]	0.148	Max. rozdíl rychlostí [m/s]	0.147

Profil 7		Profil 8		Profil 9	
Vzdálenost od vtoku [m]	6.5	Vzdálenost od vtoku [m]	7.5	Vzdálenost od vtoku [m]	8.5
Maximální rychlost [m/s]	0.087	Maximální rychlost [m/s]	0.079	Maximální rychlost [m/s]	0.067
Minimální rychlost [m/s]	-0.052	Minimální rychlost [m/s]	-0.054	Minimální rychlost [m/s]	-0.050
Max. rozdíl rychlostí [m/s]	0.139	Max. rozdíl rychlostí [m/s]	0.133	Max. rozdíl rychlostí [m/s]	0.117

Profil 10	
Vzdálenost od vtoku [m]	9.5
Maximální rychlost [m/s]	0.054
Minimální rychlost [m/s]	-0.046
Max. rozdíl rychlostí [m/s]	0.100

Profil 11	
Vzdálenost od vtoku [m]	10.5
Maximální rychlost [m/s]	0.045
Minimální rychlost [m/s]	-0.042
Max. rozdíl rychlostí [m/s]	0.087

Profil 12	
Vzdálenost od vtoku [m]	11.5
Maximální rychlost [m/s]	0.044
Minimální rychlost [m/s]	-0.034
Max. rozdíl rychlostí [m/s]	0.078

Profil 13	
Vzdálenost od vtoku [m]	12.5
Maximální rychlost [m/s]	0.031
Minimální rychlost [m/s]	-0.023
Max. rozdíl rychlostí [m/s]	0.054

Profil 14	
Vzdálenost od vtoku [m]	13.5
Maximální rychlost [m/s]	0.023
Minimální rychlost [m/s]	-0.017
Max. rozdíl rychlostí [m/s]	0.040

Profil 15	
Vzdálenost od vtoku [m]	14.5
Maximální rychlost [m/s]	0.020
Minimální rychlost [m/s]	-0.015
Max. rozdíl rychlostí [m/s]	0.035

Profil 16	
Vzdálenost od vtoku [m]	15.5
Maximální rychlost [m/s]	0.020
Minimální rychlost [m/s]	-0.015
Max. rozdíl rychlostí [m/s]	0.035

Profil 17	
Vzdálenost od vtoku [m]	16.5
Maximální rychlost [m/s]	0.021
Minimální rychlost [m/s]	-0.015
Max. rozdíl rychlostí [m/s]	0.036

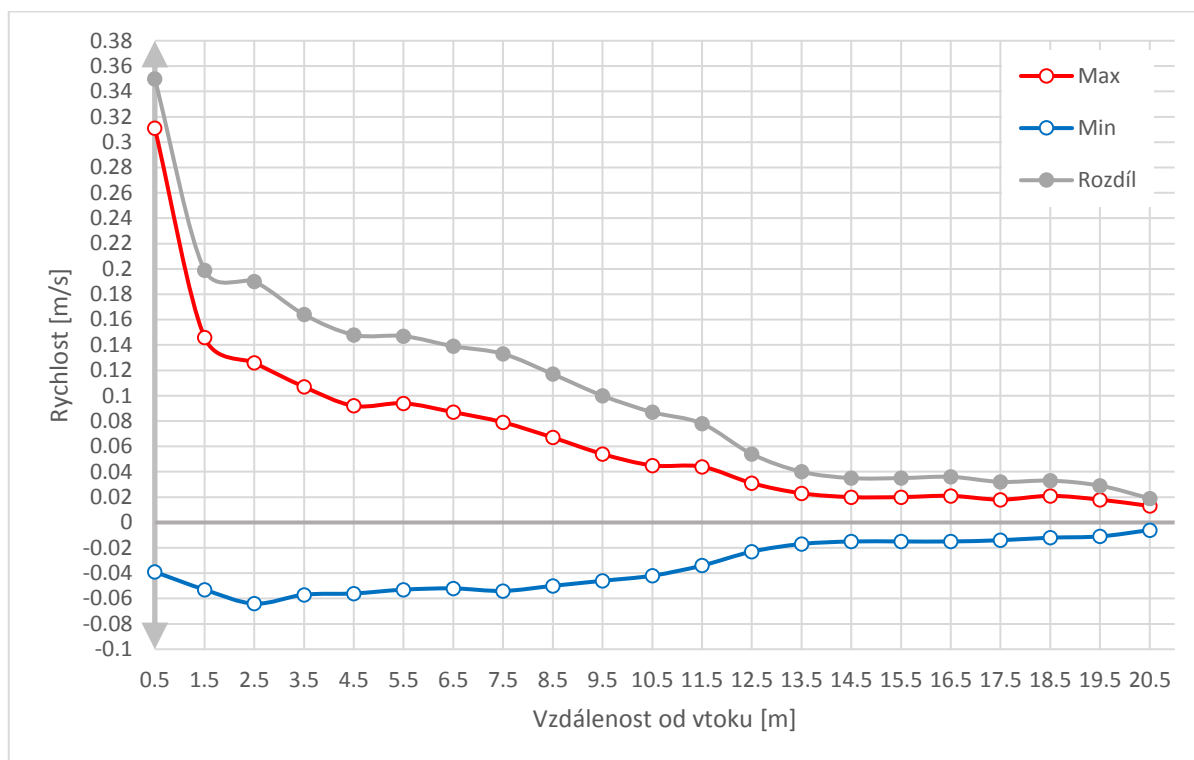
Profil 18	
Vzdálenost od vtoku [m]	17.5
Maximální rychlost [m/s]	0.018
Minimální rychlost [m/s]	-0.014
Max. rozdíl rychlostí [m/s]	0.032

Profil 19	
Vzdálenost od vtoku [m]	18.5
Maximální rychlost [m/s]	0.021
Minimální rychlost [m/s]	-0.012
Max. rozdíl rychlostí [m/s]	0.033

Profil 20	
Vzdálenost od vtoku [m]	19.5
Maximální rychlost [m/s]	0.018
Minimální rychlost [m/s]	-0.011
Max. rozdíl rychlostí [m/s]	0.029

Profil 21	
Vzdálenost od vtoku [m]	20.5
Maximální rychlost [m/s]	0.013
Minimální rychlost [m/s]	-0.006
Max. rozdíl rychlostí [m/s]	0.019

Všechny hodnoty maximálních a minimálních normálových rychlostí a maximálních rozdílů těchto rychlostí v příčných profilech podél hlavního proudění přehledně zobrazíme v grafické podobě v grafu 8.1:



Graf 8.1: Průběh max. a min. normálových rychlostí a jejich rozdílu v příčných profilech podél hlavního proudu - Var.1 Classic

Kritérium maxima difference rychlostí = $0.0990 \text{ [m}^2/\text{s]}$

Hypoteticky, čára rychlostního rozdílu v příčných profilech podél hlavního toku reprezentuje míru (ne)rovnoměrnosti tohoto toku. Čím větší je rozdíl normálových rychlostí v jistém příčném profilu, tím více je tok náchylný ke tvorbě vratných proudů.

8.4 Varianty s rozdělením průtokem a ostatní varianty

Zvolenými změnami distribuce vstupních průtoků při zachování celkového přítoku do bazénu (53 l/s), o nichž více ve stati 4.1, budeme se snažit o pokles této křivky. Dále jsou v této kapitole uvedeny pouze tabulky s ověřením výpočtem získaných výsledků, modelované trajektorie proudů, souhrnná tabulka hodnot rychlostních profilů a grafy průběhu difference rychlostí variant Var.1 - ClassicM, Var.2 - Turned, Var.2 - TurnedM, Var.3 - Combined. Varianty Var.1 - ClassicM a Var.2 - TurnedM se liší od svého originálu pouze tím, že rychlosti v každém ze vtokových míst byly přerozděleny. Rozdělení rychlostí mezi jednotlivé vtoky do bazénu je stanoveno tak, aby se celkový přítok do bazénu oproti své odpovídající originální variantě se nezměnil (viz. Tab. 3).

Jak je vidět na obrázku 4.1, proud ve variantě Var.1 - Classic je ve směru toku postupně soustřeďován ke středu bazénu a podél obou bočních stěn jsou viditelné vratné proudy. V poslední třetině délky bazénu je pak proudění usměrněno k jedné boční stěně bazénu, zatímco vratný proud je u protilehlé stěny. Pro potlačení těchto vírových struktur byly proto sníženy průtoky ve vtokách v centrální části bazénu, zatímco ve vtokách v blízkosti bočních stěn byly průtoky zvýšeny (varianty Var.1 - ClassicM a Var.2 - TurnedM).

8.4.1 Var.1 ClassicM

Tabulka 8.2: Porovnání distribuce rychlostí na vtoku ve Var.1 Classic a Var.1 ClassicM

Var.1 Classic			Var.1 ClassicM		
D = 150mm	V [m/s]	Q [l/s]	D = 150mm	V [m/s]	Q [l/s]
Vtok 1	0.5	8.836	Vtok 1	0.65	11.486
Vtok 2	0.5	8.836	Vtok 2	0.5	8.836
Vtok 3	0.5	8.836	Vtok 3	0.35	6.185
Vtok 4	0.5	8.836	Vtok 4	0.35	6.185
Vtok 5	0.5	8.836	Vtok 5	0.5	8.836
Vtok 6	0.5	8.836	Vtok 6	0.65	11.486
$\Sigma =$		53.014	$\Sigma =$		53.014

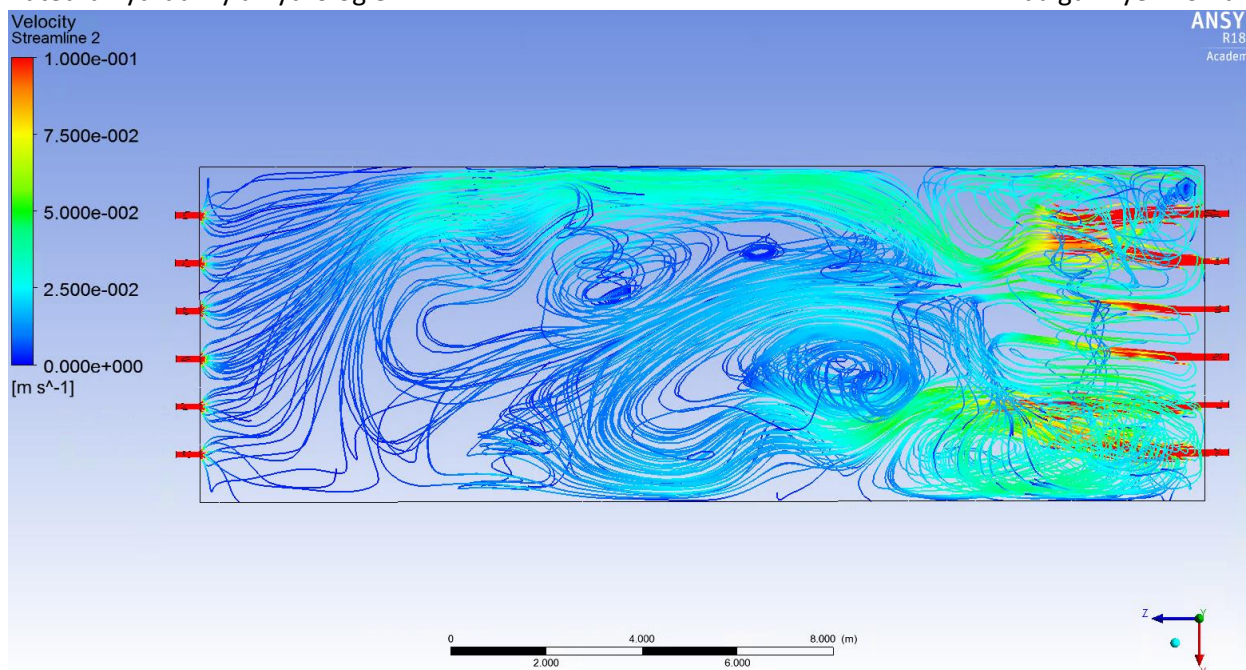
Volumetric Flow Rate		Average of Facet Values	
	(m ³ /s)	Velocity Magnitude	(m/s)
inlet_1	0.011365905	inlet_1	0.65
inlet_2	0.008657096	inlet_2	0.5
inlet_3	0.0060599844	inlet_3	0.35
inlet_4	0.006060009	inlet_4	0.35
inlet_5	0.0086571845	inlet_5	0.5
inlet_6	0.011254356	inlet_6	0.65
outlet_1	-0.0086639334	outlet_1	0.49782629
outlet_2	-0.0086852446	outlet_2	0.49651485
outlet_3	-0.0086979778	outlet_3	0.50521654
outlet_4	-0.0086545395	outlet_4	0.50850788
outlet_5	-0.0086829571	outlet_5	0.49970413
outlet_6	-0.0086689737	outlet_6	0.50167999
Net	9.0913705e-07	Net	0.50878022

Obr. 8.3: Výsledné průtoky a rychlosti v místech vtoku a výtoku pro Var.1 ClassicM

Tabulka 8.3: Přehled porovnávaných parametrů pro Var.1 ClassicM

VTOK				VÝTOK			
Hodnoty	Teoretické	Modelované	Odchylka	Hodnoty	Teoretické	Modelované	Odchylka
ρ [kg/m ³]	998.2	998.2	0.00%	ρ [kg/m ³]	998.2	998.2	0.00%
D [mm]	150.00	150.00	0.00%	D [mm]	150.00	150.00	0.00%
Počet	6	6	0.00%	Počet	6	6	0.00%
S [m ²]	0.0177	0.0173	1.86%	S [m ²]	0.0177	0.0173	2.02%
V _{okr} [m/s]	0.500	0.5000	0.00%	V _{okr} [m/s]	0.5000	0.5015	0.31%
Q ₁ [m ³ /s]	0.0088	0.0087	1.81%	Q ₁ [m ³ /s]	0.0088	0.0087	1.81%
ΣQ [m ³ /s]	0.0530	0.0521	1.81%	ΣQ [m ³ /s]	0.0530	0.0521	1.81%
Q [l/s]	8.8357	8.6758	1.81%	Q [l/s]	8.8357	8.6756	1.81%
ΣQ [l/s]	53.0144	52.0545	1.81%	ΣQ [l/s]	53.0144	52.0536	1.81%

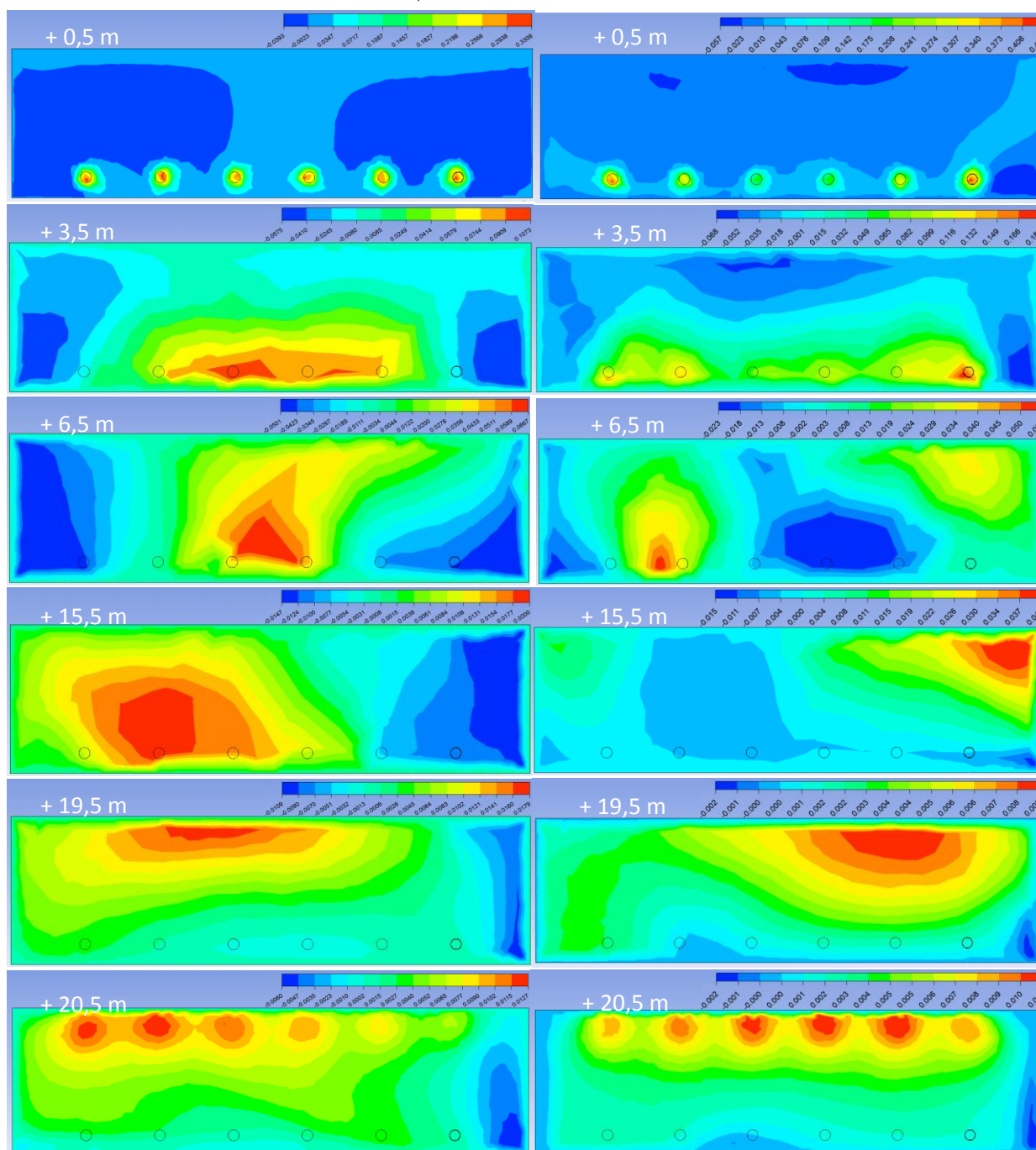
Hodnota průměrné chyby je 1,56 %. Chybu lze považovat za přípustnou a tím pádem výpočet za dostatečně přesný.



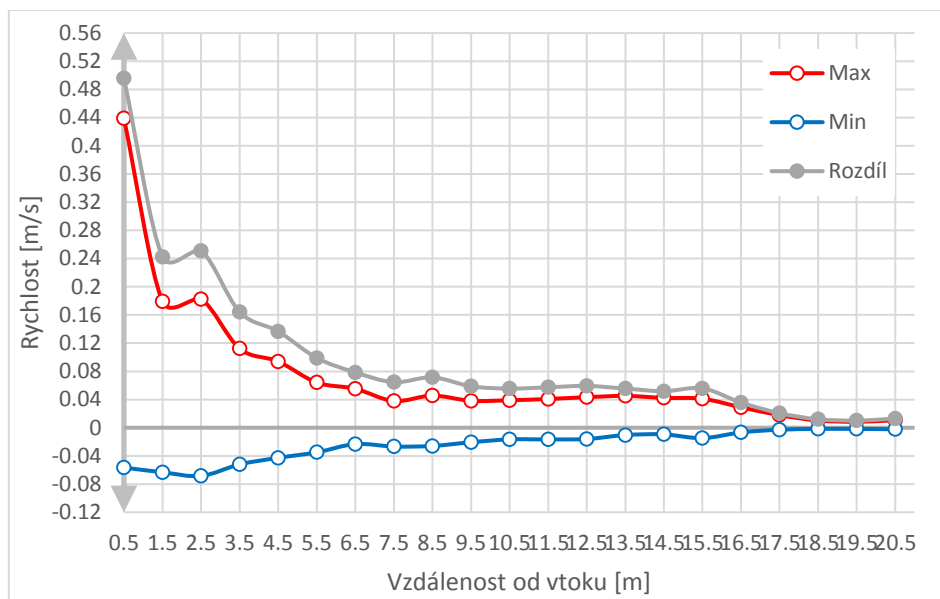
Obr. 8.4: Modelované trajektorie proudů pro Var.1 ClassicM, pohled shora

Tabulka 8.4: Přehled rychlostních profilů Var.1 ClassicM

Profil	Vzdál.	Max V [m/s]	Min V [m/s]	Rozdíl [m/s]	Integrál [m ² /s]
1	0.5	0.4392	-0.0565	0.4957	-
2	1.5	0.1794	-0.0632	0.2426	0.3692
3	2.5	0.1825	-0.0684	0.2509	0.2468
4	3.5	0.1124	-0.0520	0.1644	0.2077
5	4.5	0.0940	-0.0427	0.1368	0.1506
6	5.5	0.0641	-0.0349	0.0991	0.1179
7	6.5	0.0553	-0.0232	0.0785	0.0888
8	7.5	0.0379	-0.0267	0.0646	0.0716
9	8.5	0.0456	-0.0258	0.0714	0.0680
10	9.5	0.0382	-0.0207	0.0588	0.0651
11	10.5	0.0390	-0.0166	0.0556	0.0572
12	11.5	0.0407	-0.0166	0.0574	0.0565
13	12.5	0.0433	-0.0160	0.0593	0.0583
14	13.5	0.0451	-0.0104	0.0556	0.0574
15	14.5	0.0423	-0.0094	0.0518	0.0537
16	15.5	0.0411	-0.0148	0.0559	0.0538
17	16.5	0.0291	-0.0066	0.0357	0.0458
18	17.5	0.0178	-0.0028	0.0207	0.0282
19	18.5	0.0102	-0.0017	0.0119	0.0163
20	19.5	0.0084	-0.0017	0.0102	0.0110
21	20.5	0.0106	-0.0022	0.0128	0.0115
$\Delta =$					0.0917

Srovnání některých rychlostních polí **Var.1 Classic** a **Var.1 ClassicM**:

Obr. 8.5: Rychlostní pole pro Var.1 Classic a Var.1 ClassicM



Graf 8.2: Průběh max. a min. normálových rychlostí a jejich rozdílu v příčných profilech podél hlavního proudu pro Var.1 - ClassicM

8.4.2 Var.2 Turned

Volumetric Flow Rate		Average of Facet Values	
	(m ³ /s)	Velocity Magnitude	(m/s)
inlet_1	0.0086753865	inlet_1	0.5
inlet_2	0.0086753753	inlet_2	0.5
inlet_3	0.0086753773	inlet_3	0.5
inlet_4	0.0086753843	inlet_4	0.5
inlet_5	0.0086753758	inlet_5	0.5
inlet_6	0.0086753806	inlet_6	0.5
outlet_1	-0.0086520716	outlet_1	0.50157228
outlet_2	-0.008770117	outlet_2	0.50877001
outlet_3	-0.0087001419	outlet_3	0.51092109
outlet_4	-0.0086995582	outlet_4	0.50192892
outlet_5	-0.0086552264	outlet_5	0.49768485
outlet_6	-0.0086842685	outlet_6	0.49883415
Net	-0.00010910373	Net	0.50171941

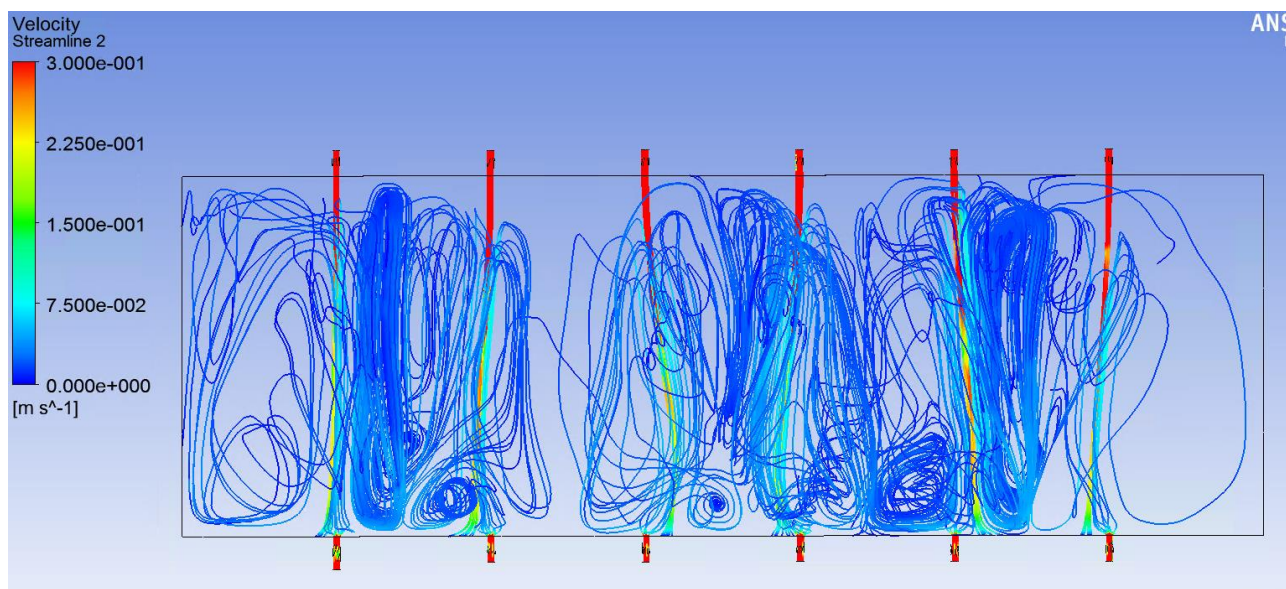
Obr. 8.6: Výsledné průtoky a rychlosti v místech vtoku a výtoku pro Var.2 Turned

Tabulka 8.5: Přehled porovnávaných parametrů Var.2 Turned

V T O K			
Hodnoty	Teoretické	Modelované	Odchylka
ρ [kg/m ³]	998.2	998.2	0.00%
D [mm]	150.00	150.00	0.00%
Počet	6	6	0.00%
S [m ²]	0.0177	0.0174	1.81%
V_{okr} [m/s]	0.500	0.5000	0.00%
Q1 [m ³ /s]	0.0088	0.0087	1.82%
ΣQ [m ³ /s]	0.0530	0.0521	1.82%
Q [l/s]	8.8357	8.6753	1.82%
ΣQ [l/s]	53.0144	52.0518	1.82%

V Ý T O K			
Hodnoty	Teoretické	Modelované	Odchylka
ρ [kg/m ³]	998.2	998.2	0.00%
D [mm]	150.00	150.00	0.00%
Počet	6	6	0.00%
S [m ²]	0.0177	0.0173	1.99%
V_{okr} [m/s]	0.5000	0.5016	0.32%
Q1 [m ³ /s]	0.0088	0.0087	1.61%
ΣQ [m ³ /s]	0.0530	0.0522	1.61%
Q [l/s]	8.8357	8.6936	1.61%
ΣQ [l/s]	53.0144	52.1617	1.61%

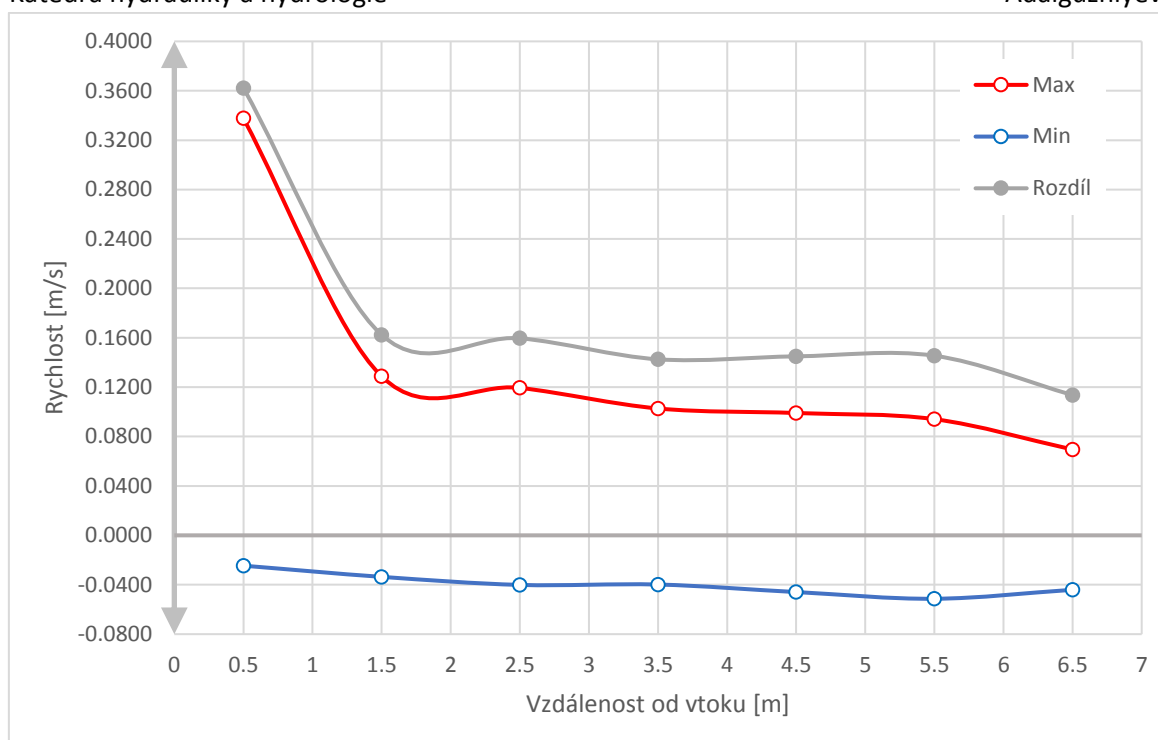
Hodnota průměrné chyby je 1,51 %. Chybu lze považovat za přípustnou a tím pádem výpočet za dostatečně přesný.



Obr. 8.7: Modelované trajektorie proudů pro Var.2 Turned, pohled shora

Tabulka 8.6: Přehled rychlostních profilů Var.2 Turned

Profil	Vzdál.	Max V [m/s]	Min V [m/s]	Rozdíl [m/s]	Integrál [m ² /s]
1	0.5	0.3377	-0.0245	0.3623	-
2	1.5	0.1288	-0.0336	0.1624	0.2623
3	2.5	0.1194	-0.0401	0.1596	0.1610
4	3.5	0.1027	-0.0398	0.1426	0.1511
5	4.5	0.0990	-0.0459	0.1450	0.1438
6	5.5	0.0941	-0.0514	0.1454	0.1452
7	6.5	0.0695	-0.0441	0.1136	0.1295
$\Delta =$					0.1655



Graf 8.3: Průběh max. a min. normálových rychlostí a jejich rozdílu v příčných profilech podél hlavního proudu pro Var.2 - Turned

8.4.3 Var.2 TurnedM

Tabulka 8.7: Porovnání distribuce rychlostí na vtoků ve Var.2 Turned a Var.2 TurnedM

Var.2 Turned			Var.2 TurnedM		
D = 150mm	V [m/s]	Q [l/s]	D = 150mm	V [m/s]	Q [l/s]
Vtok 1	0.5	8.836	Vtok 1	0.65	11.486
Vtok 2	0.5	8.836	Vtok 2	0.5	8.836
Vtok 3	0.5	8.836	Vtok 3	0.35	6.185
Vtok 4	0.5	8.836	Vtok 4	0.35	6.185
Vtok 5	0.5	8.836	Vtok 5	0.5	8.836
Vtok 6	0.5	8.836	Vtok 6	0.65	11.486
Σ =		53.014	Σ =		53.014

Volumetric Flow Rate		Average of Facet Values	
	(m ³ /s)	Velocity Magnitude	(m/s)
inlet_1_var.2_turned_	0.011278002	inlet_1_var.2_turned_	0.65
inlet_2_var.2_turned_	0.0086753753	inlet_2_var.2_turned_	0.5
inlet_3_var.2_turned_	0.0060727641	inlet_3_var.2_turned_	0.35
inlet_4_var.2_turned_	0.006072769	inlet_4_var.2_turned_	0.35
inlet_5_var.2_turned_	0.0086753758	inlet_5_var.2_turned_	0.5
inlet_6_var.2_turned_	0.011277995	inlet_6_var.2_turned_	0.65
outlet_1_var.2_turned_	-0.0086846499	outlet_1_var.2_turned_	0.50321485
outlet_2_var.2_turned_	-0.0087111409	outlet_2_var.2_turned_	0.50329859
outlet_3_var.2_turned_	-0.008727906	outlet_3_var.2_turned_	0.512186
outlet_4_var.2_turned_	-0.0087162554	outlet_4_var.2_turned_	0.50341879
outlet_5_var.2_turned_	-0.0086630833	outlet_5_var.2_turned_	0.49595587
outlet_6_var.2_turned_	-0.0085377231	outlet_6_var.2_turned_	0.49026503
Net	1.1522745e-05	Net	0.50263431

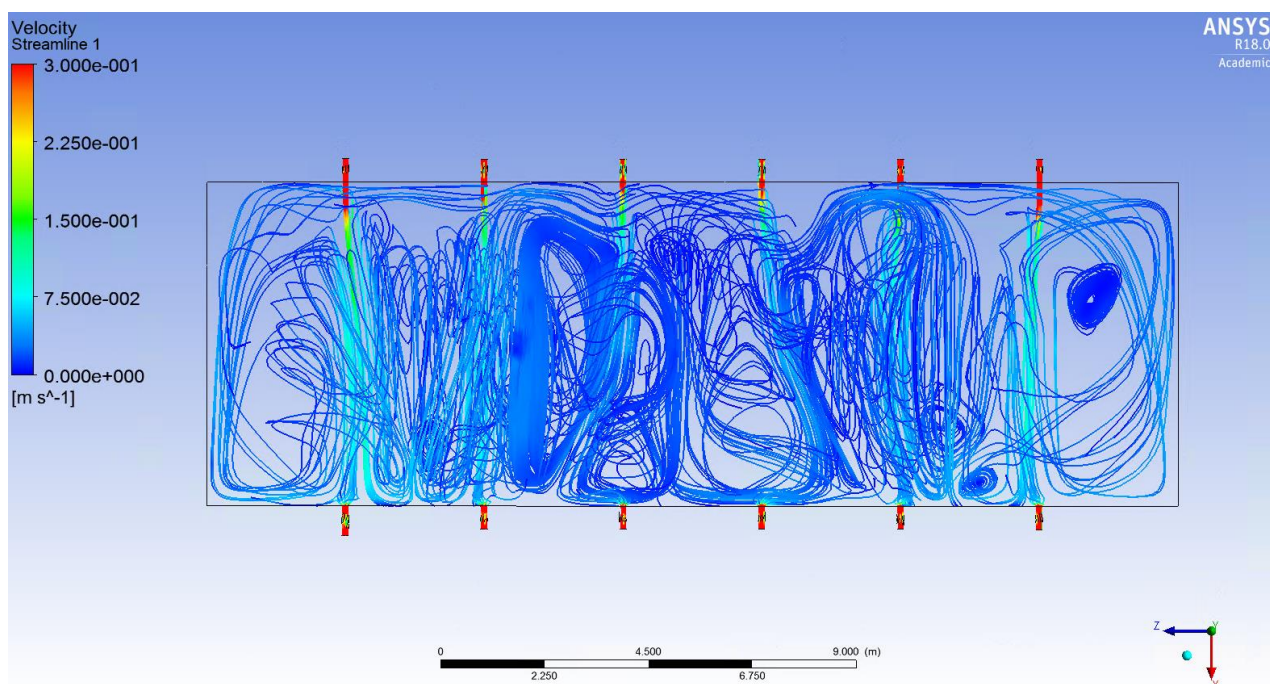
Obr. 8.8: Výsledné průtoky a rychlosti v místech vtoku a výtoku pro Var.2 - TurnedM

Tabulka 8.8: Přehled srovnávacích parametrů Var.2 TurnedM

V T O K			
Hodnoty	Teoretické	Modelované	Odchylka
ρ [kg/m ³]	998.2	998.2	0.00%
D [mm]	150.00	150.00	0.00%
Počet	6	6	0.00%
S [m ²]	0.0177	0.0173	1.86%
V_{okr} [m/s]	0.500	0.5000	0.00%
Q1 [m ³ /s]	0.0088	0.0087	1.81%
ΣQ [m ³ /s]	0.0530	0.0521	1.81%
Q [l/s]	8.8357	8.6754	1.81%
ΣQ [l/s]	53.0144	52.0523	1.81%

V Ý T O K			
Hodnoty	Teoretické	Modelované	Odchylka
ρ [kg/m ³]	998.2	998.2	0.00%
D [mm]	150.00	150.00	0.00%
Počet	6	6	0.00%
S [m ²]	0.0177	0.0173	2.02%
V_{okr} [m/s]	0.5000	0.5014	0.28%
Q1 [m ³ /s]	0.0088	0.0087	1.84%
ΣQ [m ³ /s]	0.0530	0.0520	1.84%
Q [l/s]	8.8357	8.6735	1.84%
ΣQ [l/s]	53.0144	52.0408	1.84%

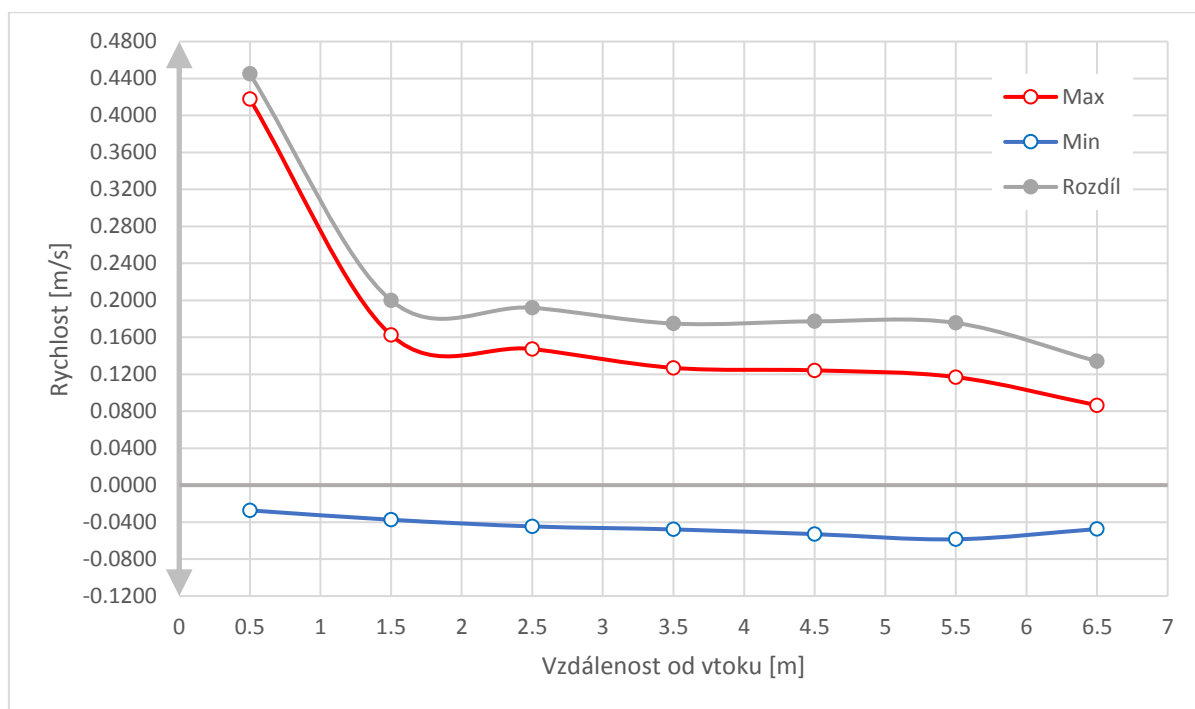
Hodnota průměrné chyby je 1,81 %. Chybu lze považovat za přípustnou a tím pádem výpočet za dostatečně přesný.



Obr. 8.9: Modelované trajektorie proudů pro Var.2 TurnedM, pohled shora

Tabulka 8.9: Přehled rychlostních profilů Var.2 TurnedM

Profil	Vzdál.	Max V [m/s]	Min V [m/s]	Rozdíl [m/s]	Integrál [m ² /s]
1	0.5	0.4177	-0.0273	0.4450	-
2	1.5	0.1624	-0.0375	0.1999	0.3224
3	2.5	0.1473	-0.0447	0.1920	0.1959
4	3.5	0.1269	-0.0479	0.1748	0.1834
5	4.5	0.1242	-0.0530	0.1772	0.1760
6	5.5	0.1169	-0.0586	0.1755	0.1764
7	6.5	0.0864	-0.0475	0.1340	0.1547
$\Delta =$					0.2015



Graf 8.4: Průběh max. a min. normálových rychlostí a jejich rozdílu v příčných profilech podél hlavního proudu pro Var.2 - TurnedM

8.4.4 Var.3 Combined

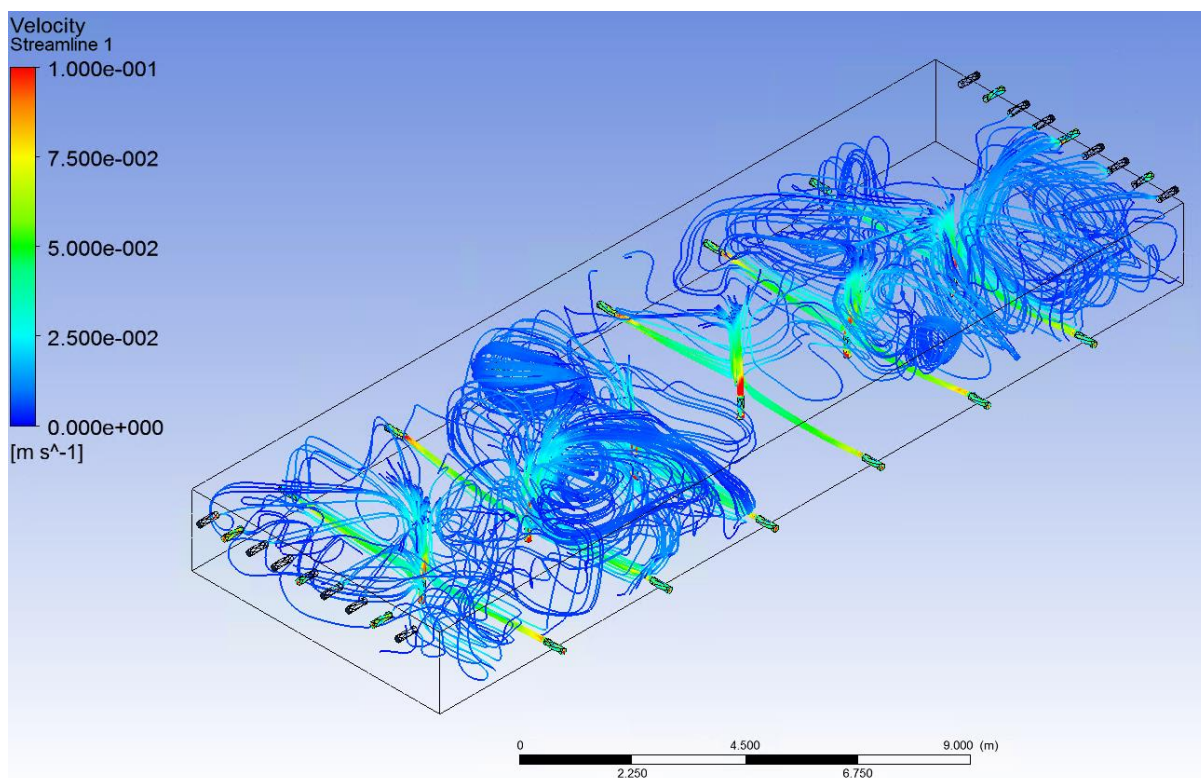
Volumetric Flow Rate		Average of Facet Values	
	(m ³ /s)	Velocity Magnitude	(m/s)
inlet_bottom_1	0.0028857185	inlet_bottom_1	0.16666667
inlet_bottom_2	0.0028857102	inlet_bottom_2	0.16666667
inlet_bottom_3	0.0028857184	inlet_bottom_3	0.16666667
inlet_bottom_4	0.0028857111	inlet_bottom_4	0.16666667
inlet_bottom_5	0.0028857176	inlet_bottom_5	0.16666667
inlet_bottom_6	0.0028857114	inlet_bottom_6	0.16666667
inlet_wall_1_1	0.0024356964	inlet_wall_1_1	0.16666667
inlet_wall_1_2	0.0024356964	inlet_wall_1_2	0.16666667
inlet_wall_1_3	0.0024356964	inlet_wall_1_3	0.16666667
inlet_wall_1_4	0.0024356964	inlet_wall_1_4	0.16666667
inlet_wall_1_5	0.0024356964	inlet_wall_1_5	0.16666667
inlet_wall_1_6	0.0024356964	inlet_wall_1_6	0.16666667
inlet_wall_2_1	0.0024356964	inlet_wall_2_1	0.16666667
inlet_wall_2_2	0.0024356964	inlet_wall_2_2	0.16666667
inlet_wall_2_3	0.0024356964	inlet_wall_2_3	0.16666667
inlet_wall_2_4	0.0024356964	inlet_wall_2_4	0.16666667
inlet_wall_2_5	0.0024356964	inlet_wall_2_5	0.16666667
inlet_wall_2_6	0.0024356964	inlet_wall_2_6	0.16666667
outlet	-0.046534727	outlet	0.17532628
Net	7.9172903e-06	Net	0.16820128

Obr. 8.10: Výsledné průtoky a rychlosti v místech vtoku a výtoku pro Var.3 - Combined

Tabulka 8.10: Přehled srovnávacích parametrů Var.3 Combined)

V T O K				V Ý T O K			
Hodnoty	Teoretické	Modelované	Odchylka	Hodnoty	Teoretické	Modelované	Odchylka
ρ [kg/m ³]	998.2	998.2	0.00%	ρ [kg/m ³]	998.2	998.2	0.00%
D [mm]	150.00	150.00	0.00%	D [mm]	150.00	150.00	0.00%
Počet	18	18	0.00%	Počet	18	18	0.00%
S [m ²]	0.0177	0.0173	1.86%	S [m ²]	0.0177	0.0173	2.02%
V_{okr} [m/s]	0.167	0.1667	0.00%	V_{okr} [m/s]	0.1667	0.1753	5.20%
Q1 [m ³ /s]	0.0029	0.0026	12.21%	Q1 [m ³ /s]	0.0029	0.0026	12.22%
ΣQ [m ³ /s]	0.0530	0.0465	12.21%	ΣQ [m ³ /s]	0.0530	0.0465	12.22%
Q [l/s]	2.9452	2.5857	12.21%	Q [l/s]	2.9452	2.5852	12.22%
ΣQ [l/s]	53.0144	46.5426	12.21%	ΣQ [l/s]	53.0144	46.5340	12.22%

Hodnota průměrné chyby je 6,70 %. Chybu lze považovat za ještě přípustnou a tím pádem výpočet za přijatelně přesný.



Obr. 8.11: Modelované trajektorie proudů pro Var.3 - Combined – axonometrický pohled

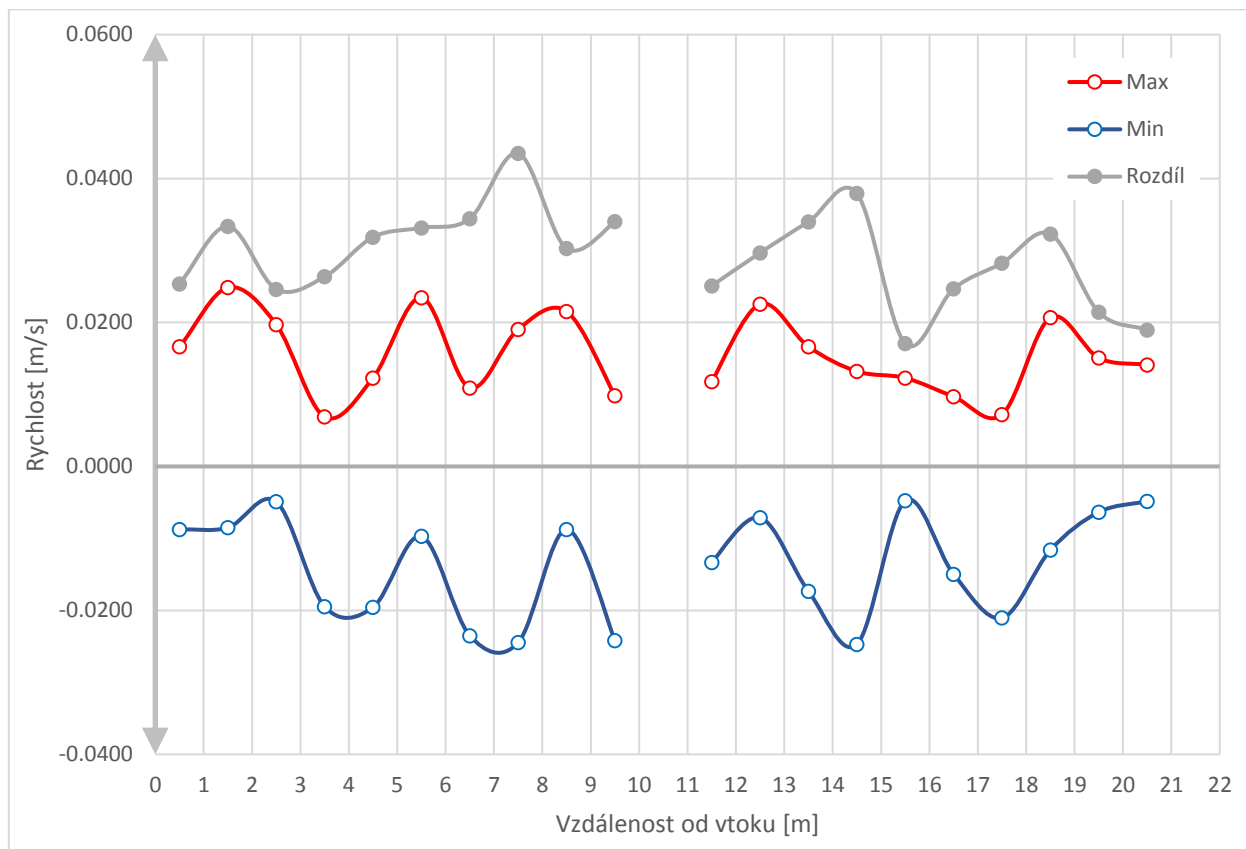
Tabulka 8.11: Přehled rychlostních profilů Var.3 Combined

Profil	Vzdál.	Max V [m/s]	Min V [m/s]	Rozdíl [m/s]	I [m ² /s]
1	0.5	0.0166	-0.0088	0.0254	-
2	1.5	0.0249	-0.0085	0.0334	0.0294
3	2.5	0.0197	-0.0049	0.0246	0.0290
4	3.5	0.0069	-0.0195	0.0264	0.0255
5	4.5	0.0123	-0.0196	0.0319	0.0291
6	5.5	0.0235	-0.0097	0.0332	0.0325
7	6.5	0.0109	-0.0235	0.0344	0.0338
8	7.5	0.0191	-0.0245	0.0435	0.0390
9	8.5	0.0216	-0.0087	0.0303	0.0369
10	9.5	0.0098	-0.0242	0.0340	0.0322
					Δ = 0.031918

Profil	Vzdál.	Max V [m/s]	Min V [m/s]	Rozdíl [m/s]	Integral [m ² /s]
12	11.5	0.0118	-0.0133	0.0251	-
13	12.5	0.0226	-0.0071	0.0297	0.0274
14	13.5	0.0167	-0.0174	0.0340	0.0318
15	14.5	0.0132	-0.0247	0.0379	0.0360
16	15.5	0.0123	-0.0048	0.0171	0.0275
17	16.5	0.0097	-0.0150	0.0247	0.0209
18	17.5	0.0072	-0.0211	0.0283	0.0265
19	18.5	0.0207	-0.0116	0.0323	0.0303
20	19.5	0.0151	-0.0064	0.0214	0.0269
21	20.5	0.0141	-0.0048	0.0190	0.0202
					Δ = 0.027485

Rychlostní profily Var.3 Combined jsou rozděleny do dvou tabulek kvůli směru protiproudu vůči výtokům na obou kratších stěnách bazénu.

Průměrná hodnota dvou částí je 0,0297 m²/s.



Graf 8.5: (Průběh max. a min. normálových rychlostí a jejich rozdílu v příčných profilech podél hlavního proudu pro Var.3 - Combined)

9 POSUDEK

Podle výsledků, uvedených v kapitole 8, je možný posoudit vliv polohy míst vtoku a výtoku, jejich počet a vliv distribuce velikosti průtoků ve vtokových potrubích na celkový charakter struktury proudění takto:

- a) Při změně distribuce průtoků na vtoku ve variantě Var.1 Classic, jak je uvedeno v kapitole 8.4.1, se průměrný ukazatel, kterým je maximální rychlostní rozdíl v profilech podél hlavního proudění zlepšil o 7.4 % ($0.0990 \text{ m}^2/\text{s} \rightarrow 0.0917 \text{ m}^2/\text{s}$) a voda protékající bazénem ve směru hlavního proudu už netvoří tok soustředěný uprostřed bazénu, ale pohybuje se směrem k výtoku poměrně vyrovnanějším rychlostním polem. Avšak pro variantu Var.2 - Turned má tato změna opačný účinek, hodnota kritéria se zhoršila o 17.8 % ($0.1655 \text{ m}^2/\text{s} \rightarrow 0.2015 \text{ m}^2/\text{s}$)
- b) Vliv změny vzájemné osové vzdálenosti vtoků i výtoků vůči sobě a změna délky hlavního proudu se projevuje dost markantně. Pokud porovnáme výsledky simulace varianty Var. 1 -Classic a Var. 2 -Turned prostřednictvím výpočtu hodnotícího kritéria (průměrná hodnota maximálních rozdílů rychlostí ve směru hlavního proudění) činí rozdíl v tomto hodnotícím kritériu 40,2 % ($0,0990 \text{ m}^2/\text{s} \rightarrow 0,1655 \text{ m}^2/\text{s}$). Z toho lze usoudit, že kratší vzdálenost mezi vtokem a výtokem negativně ovlivňuje strukturu proudění vody v bazénu s větším výskytem mrtvých zón. Voda vytékající ze vtokového místa se nestihne uklidnit a narazí na relativně blízkou protilehlou stěnu. To je příčinou vzniku většího počtu vratných proudů, s nimiž si spojujeme vznik mrtvých zón.
- c) Nejlepšího výsledek byl získán pro třetí variantu Var. 3 -Combined – kde ukazatel průměrného maximálního rozdílu rychlostí je $0,0297 \text{ m}^2/\text{s}$. Je to o 67,6 % lepší než pro variantu Var. 1 - Classic. Lze to vysvětlit tím, že při vtoku vody ze stěn a dna do bazénu otvory umístěnými proti sobě dojde při setkání proudů k utlumení pohybu a voda dále směřuje k výtoku rovnoměrnějším proudem. Taktéž byl trojnásobně zvětšen počet vtokových a odtokových míst, což zvětšilo celkovou plochu pro vtoková a odtoková místa, a rychlost na každém vtoku se tedy adekvátně snížila, což lze považovat zřejmě za nejdůležitější příčinu.

Na základě uvedených výsledků můžeme usuzovat, že při návrhu počtu, polohy vtokových a odtokových míst (vzájemné osové vzdálenosti mezi vstupními a výstupními otvory) a směrové orientace vstupních proudů do bazénu musíme mít na zřeteli následující: 1) Čím delší dráhu překoná proud mezi vtokem a odtokem z bazénu, tím lépe se stihne uklidnit a promíchat se stávající vodou v bazénu; 2) větší počet vtokových a výtokových míst zajistí lepší distribuci průtoků; 3) úprava distribuce průtokového množství na přítoku může za určitých okolností eliminovat soustředění průtoků v bazénu a nevyrovnanost hydraulických poměrů.

10 ZÁVĚR

V rámci zpracované bakalářské práce jsem se seznámil s problematikou proudění v plaveckých bazénech při zajištění optimálních hydraulických podmínek výměny vody v bazénové části. Výpočet byl prováděn pomocí simulačního CFD software FLUENT v rámci balíku ANSYS Workbench.

Na mnou zvolených variantách uspořádání vtokových a výtokových míst do/z bazénu, kde byly měněny vzdálenosti mezi jednotlivými vtokovými a výtokovými místy, délka dráhy proudění a přerozdělení vstupního průtoku, jsem se pokusil o návrh vhodného hodnotícího kritéria pro dosažení optimálních hydraulických podmínek proudění v plaveckých bazénech.

V rámci této bakalářské práce se zatím nepodařilo zcela jednoznačně ověřit, zda využití navrženého hodnotícího kritéria (**průměr z maximálních diferencí rychlostí počítaných v příčných profilech kolmých na hlavní směr proudění**) je vhodným ukazatelem pro odstranění „mrtvých“ zón proudění v bazénech a vede vždy ke zlepšení celkových hydraulických podmínek zajišťujících rovnoměrnou výměnu vody v bazénu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] <http://www.enviweb.cz/68741>
- [2] Vyhláška č. 464/2000 Sb. § 7 <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-464>
- [3] Vyhláška č. 464/2000 Sb. § 8(2) <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-464>